



ENERGIE



**BÜNDNIS 90
DIE GRÜNEN**
LANDTAG THÜRINGEN

Untersuchung zur Stromversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz aus 100 % erneuerbarer Energien

Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak, M.Eng. Sebastian Voswinckel, B.Eng. Maria Nuschke

Im Auftrag von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN Landtagsfraktion Thüringen



Liebe Leserinnen und Leser,

mit dem energiepolitischen Programm „Grüne Energie für Thüringen“ haben BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN bereits 2008 eine Energieversorgung auf Basis von 100 Prozent erneuerbaren Energien in den Mittelpunkt der Diskussion gerückt. Mit dem Atomausstieg und der Energiewende hat dieses Ziel realistische Züge angenommen. Jetzt geht es darum, den Weg dahin zu gestalten. Wenn es um neue Wohngebäude geht, haben wir bereits heute recht konkrete Vorstellungen. Die eingeführten Konzepte von Niedrigenergie-, Passiv- und Energieplus-Häusern machen eine bilanzielle, eigenständige Energieversorgung realistisch. Geht es allerdings um die Industrie, dann fehlen diese Vorstellungen bisher. Denn anders als im Wohnbereich erfordern Industrieprozesse oft einen gleichbleibend hohen Energiebedarf über 24 Stunden an 365 Tagen im Jahr. Damit werden in der Zukunft auch andere Anforderungen an den Energiemix aus fluktuierenden erneuerbaren Energien gestellt.

Mit dem Erfurter Kreuz wenden wir uns dem größten Industriegebiet in Thüringen zu. Die vorliegende Studie zeigt, dass die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien für ein solches Industriegebiet weiträumig angelegt sein muss und alle Energieformen in einem ausgewogenen Verhältnis benötigt. Neben einem deutlichen Ausbau der Erneuerbaren werden die Speicherung und Verteilung von Energie künftig zum Hauptmerkmal einer Stromerzeugung ohne den Einsatz fossiler Brennstoffe werden. Nur auf diese Weise wird es möglich sein, die Versorgungsaufgabe überwiegend dezentral zu bewältigen.

Diesen Herausforderungen an die Infrastruktur müssen wir uns stellen, weil sie einen wichtigen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz leisten und gleichzeitig unsere Unabhängigkeit von endlichen Ressourcen sichern.

Diesen Weg müssen wir mit allen Bürgerinnen und Bürgern gemeinsam gehen. Wir brauchen Stromleitungen, Speicher und Energieerzeugungsanlagen. Für uns Grüne ist jedoch klar, dass dabei Beteiligung und Transparenz immer eine wesentliche Rolle spielen müssen. Zudem muss die Industrie einen angemessenen Beitrag für den Umbau der Infrastruktur leisten. Hinzu kommt der Anspruch bei der Energieeffizienz und -einsparung, weitaus größere Potenziale als bisher zu nutzen.

Zusammenfassend macht die Studie deutlich, dass es mit der Erzeugung, der Speicherung und dem Transport erneuerbarer Energien noch ein großes Wertschöpfungspotenzial in Thüringen zu erschließen gilt. Besonders mit der Rekommunalisierung der E.ON Thüringer Energie AG sind die Chancen stärker an die Menschen vor Ort herangerückt. Benötigt werden jetzt klare Ausbaupfade für eine Versorgung aus erneuerbaren Energien, die auf der Ebene der Thüringer Planungsregionen entwickelt werden. Damit müssen wir in Zukunft beantworten, wie viele solcher Industriegebiete in Thüringen erneuerbar versorgt werden können. Mit der Ihnen vorliegenden Studie zur Stromversorgung des Erfurter Kreuzes leisten wir zu dieser Diskussion einen ersten Beitrag.

Ihr Dirk Adams, MdL

Energiepolitischer Sprecher
von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN
Landtagsfraktion Thüringen



in.RET
Institut für
Regenerative Energietechnik

Prof. Dr.-Ing. Viktor Wesselak

M.Eng. Sebastian Voswinkel

B.Eng. Maria Nuschke

**Untersuchung zur Stromversorgung der
Industriegroßfläche Erfurter Kreuz
aus 100% erneuerbarer Energien**

24. April 2013

ENTWURF

Projektbeteiligte

Auftraggeber: BÜNDNIS 90 / DIE GRÜNEN
Landtagsfraktion Thüringen
Jürgen-Fuchs-Straße 1
99096 Erfurt

Auftragnehmer: Fachhochschule Nordhausen
Institut für Regenerative Energietechnik (in.RET)
Weinberghof 4
99734 Nordhausen
vertreten durch den Präsidenten
Prof. Dr. Jörg Wagner

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	v
Tabellenverzeichnis	viii
1. Bestandsanalyse	1
1.1. Standortspezifischer Energieverbrauch	1
1.2. Erneuerbare Energieproduktion	3
1.2.1. Erzeugerprofil Photovoltaik und Windenergie	3
1.3. Stromgestehungskosten	6
1.3.1. Stromgestehungskosten Photovoltaik	6
1.3.2. Stromgestehungskosten Windenergie	7
1.3.3. Stromgestehungskosten Biomasse	7
1.3.4. Speicherkosten	8
2. Energieerzeugungspotenziale	10
2.1. Technisches Potenzial zur elektrischen Energiebereitstellung aus Photovoltaik, Windenergie und Biomasse	10
2.2. Szenarienbasierte Potenzialausschöpfung	11
2.2.1. Referenzszenario	11
2.2.2. Ambitioniertes Szenario	12
2.2.3. Exzellenzszenario	12
2.3. Prognostizierte verfügbare Potenziale	12
3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität	14
3.1. Summarische Bedarfsdeckung	14
3.1.1. Energiebedarf	14
3.1.2. Energiebereitstellung mittels Photovoltaik	15
3.1.3. Energiebereitstellung mittels Windenergie	16
3.1.4. Energiebereitstellung mittels Biogas	18
3.2. Erzeugermix	20
3.2.1. Ermittlung des Versorgungsgrads	21
3.2.2. Bedarfsdeckung mit einem Mix aus Photovoltaik, Windenergie ohne Biogas	22
3.2.3. Bedarfsdeckung mit einem Mix aus Photovoltaik, Windenergie und Biogas	23

3.2.4. Bedarfssteigerung	24
4. Bewertung	27
Anhang A. Meterologische Rahmenbedingungen	29
A.1. Einstrahlung	29
A.2. Mittlere Windgeschwindigkeit	30
A.3. Biomasse	31
Anhang B. Berechnungsergebnisse	32
B.1. Bedarfsdeckung mit einem Mix aus Photovoltaik, Windenergie und Biogas	32
B.1.1. Variante hoher PV Anteil	32
B.1.2. Variante Medium	35
B.1.3. Variante hoher Windanteil	38
B.1.4. Variante Maximum	41
B.2. Bedarfsdeckung mit einem Mix aus Photovoltaik, Windenergie und 20 MW _{el} Biogas . .	44
B.2.1. Variante hoher PV Anteil	44
B.2.2. Variante Medium	47
B.2.3. Variante hoher Windanteil	50
B.2.4. Variante Maximum	53
B.3. Bedarfssteigerung 124 MW	56
B.3.1. Variante hoher PV Anteil	56
B.3.2. Variante Medium	59
B.3.3. Variante hoher Windanteil	62
B.3.4. Variante Maximum	65
B.4. Bedarfssteigerung 146 MW	68
B.4.1. Variante hoher PV Anteil	68
B.4.2. Variante Medium	71
B.4.3. Variante hoher Windanteil	74
B.4.4. Variante Maximum	77
Literaturverzeichnis	80

Abbildungsverzeichnis

1.1. Lastgang und Jahresdauerlinie Industriegroßfläche Erfurter Kreuz (Messwerte)	2
1.2. Monatlicher Energieverbrauch Industriegroßfläche Erfurter Kreuz	2
1.3. Lastverlauf vom 23. April bis 29. April 2012 (KW 17)	3
1.4. Typische Energieerzeugungsprofile einer Photovoltaikanlage	4
1.5. Typische Energieerzeugungsprofile einer Windenergieanlage	5
1.6. Monatsmittelwerte durchschnittlicher Tagesgänge einer Windenergie- und PV-Anlage .	5
1.7. Stromgestehungskosten	8
3.1. Synthetisch auf ein Jahr erweiterter Lastgang und Jahresdauerlinie	14
3.2. Dauerlinie Photovoltaikleistung 335 MW _p	16
3.3. Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit und Anlagenkennlinie	17
3.4. Dauerlinie Windenergieleistung 199 MW	17
3.5. Auszug aus dem Energiebedarfs- und Erzeugungslastgang mit einer installierten Leistung von 15 MW _p Photovoltaik, 199 MW Windkraft und 20 MW _{el} Biogas.	19
3.6. Auszug aus dem Energiebedarfs- und Erzeugungslastgang mit einer installierten Leistung von 912 MW _p Photovoltaik, 168 MW Windkraft und 20 MW _{el} Biogas. Für diese Darstellung wurde eine Energiebedarfssteigerung auf 866 GWh/a angenommen. Dadurch entsteht ein erhöhter Leistungsbedarf von Photovoltaik- und Windenergieanlagen (vgl. Abschn. 3.2.4).	20
3.7. Versorgungsgrad (in Prozent) in Abhängigkeit der installierten Leistung von Photovoltaik- und Windenergieanlagen sowie Biogas zur Spitzenlastdeckung.	21
3.8. Gesamtstromgestehungskosten ohne Biomasse	22
3.9. Gesamtstromgestehungskosten mit 20 MW _{el} Biomasse	24
B.1. Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante hoher PV Anteil, ohne Biogas	33
B.2. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante hoher PV Anteil, ohne Biogas	34
B.3. Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante Medium, ohne Biogas . . .	36
B.4. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante Medium, ohne Biogas	37
B.5. Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante hoher Windanteil, ohne Biogas	39

B.6. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante hoher Windanteil, ohne Biogas	40
B.7. Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante MAXIMUM, ohne Biogas .	42
B.8. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante MAXIMUM, ohne Biogas	43
B.9. Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante hoher PV Anteil	45
B.10. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante hoher PV Anteil	46
B.11. Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante Medium	48
B.12. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante Medium	49
B.13. Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante hoher Windanteil	51
B.14. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante hoher Windanteil	52
B.15. Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante MAXIMUM	54
B.16. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh, Variante MAXIMUM	55
B.17. Lastgang bei einem Energiebedarf von 866 GWh, Variante hoher PV Anteil	57
B.18. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 866 GWh, Variante hoher PV Anteil	58
B.19. Lastgang bei einem Energiebedarf von 866 GWh, Variante Medium	60
B.20. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 866 GWh, Variante Medium	61
B.21. Lastgang bei einem Energiebedarf von 866 GWh, Variante hoher Windanteil	63
B.22. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 866 GWh, Variante hoher Windanteil	64
B.23. Lastgang bei einem Energiebedarf von 866 GWh, Variante MAXIMUM	66
B.24. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 866 GWh, Variante MAXIMUM	67
B.25. Lastgang bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh, Variante hoher PV Anteil	69
B.26. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh, Variante hoher PV Anteil	70
B.27. Lastgang bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh, Variante Medium	72
B.28. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh, Variante Medium	73
B.29. Lastgang bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh, Variante hoher Windanteil	75

B.30. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh, Variante hoher Windanteil	76
B.31. Lastgang bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh, Variante MAXIMUM	78
B.32. Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh, Variante MAXIMUM	79

Tabellenverzeichnis

1.1. Verfügbare Flächen der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz	1
1.2. Vergütung von Strom aus Photovoltaikanlagen nach dem EEG	6
2.1. Technisches Energieerzeugungspotenzial in den Gemeinden Arnstadt und Ichtershausen [1].	10
2.2. Technisches Energieerzeugungspotenzial im Ilm-Kreis und in der Planungsregion Mit- telthüringen nach [1].	10
2.3. Prognostizierter Strombedarf und verfügbares Energieerzeugungspotenzial im Ilm-Kreis nach [1] im Jahr 2020.	12
2.4. Prognostizierter Strombedarf und prognostizierte Stromerzeugung in der Planungsre- gion Mittelthüringen nach [1].	13
3.1. Kennwerte der zugrunde gelegten Photovoltaikanlage	15
3.2. Kennwerte der zugrunde gelegten Windenergieanlage	16
3.3. Durchschnittliche Biogasausbeute für verschiedene Substrate	18
3.4. Kennwerte einer 20 MW Biogasanlage	19
3.5. Gesamtstromgestehungskosten ohne Biogas	23
3.6. Gesamtstromgestehungskosten mit 20 MW _{el} Biogas bei einem Energiebedarf von 318 GWh	23
3.7. Prognostizierte installierte Leistung erneuerbarer Energien in der Planungsregion Mit- telthüringen nach [1].	25
3.8. Gesamtstromgestehungskosten mit 20 MW _{el} Biogas bei einem Energiebedarf von 866 GWh	25
3.9. Gesamtstromgestehungskosten mit 20 MW _{el} Biogas bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh	26
A.1. Globalstrahlungswerte Standort Erfurt-Bindersleben Zeitraum 1981 - 200	29
A.2. Windgeschwindigkeit am Standort Erfurt-Bindersleben Zeitraum 1981 - 2000	30

1. Bestandsanalyse

Die Industriegroßfläche Erfurter Kreuz befindet sich im Bundesland Thüringen, zwischen den Kommunen Arnstadt, Ichtershausen und Thörey. Die Industriegroßfläche umfasst eine Bruttofläche von 472,57 ha, wovon 17,00 ha unmittelbar als industrielle Freifläche zur Verfügung stehen. Nach Tab. 1.1 ergeben sich 177,17 ha im Bereich der Gewerbefläche. Die Energieversorgung erfolgt über drei

Tab. 1.1.: Verfügbare Flächen der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz. Die erschlossene Fläche kann bei Bedarf erweitert werden. [2]

Flächenart	Fläche ha
Bruttofläche	472,57
Nettofläche	348,40
Nettofläche Industrie	322,60
erschlossene Fläche	162,43
freie Fläche	20,00
freie Fläche Industrie	17,00
noch zur Verfügung	177,17

Transformatorstationen mit jeweils 2 Unterspannungswicklungen (110kV/20kV/20kV) auf der Mittelspannungsebene. Das Spannungsniveau der Energieversorgung beträgt demnach 20 kV.

1.1. Standortspezifischer Energieverbrauch

Der Energieverbrauch der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz wird anhand der realen Verbrauchszahlen aus dem Zeitraum 01. Januar 2012 bis 31. Juli 2012 bewertet werden. Diese Daten wurden für diese Untersuchung freundlicherweise von der E.ON Thüringer Energie AG bereitgestellt. Die beim Energieversorger vertraglich angemeldete Bestelleistung beläuft sich auf 124 MW. Diese Leistung muss rund um die Uhr bereitgestellt werden können, auch wenn durchschnittlich eine deutlich geringere Leistung abgenommen wird. Ferner besteht seitens der Gewerbekunden eine Erweiterungsoption auf eine maximale Bestelleistung von insgesamt 146 MW.

Der zeitliche Verlauf sowie die Jahresdauerlinie im Verbrauchszeitraum ist in Abb. 1.1 dargestellt. Der Verlauf des Energieverbrauchs im Betrachtungszeitraum zeigt keine ausgeprägten, von der Jahreszeit abhängigen Schwankungen. Der vorliegende Lastverlauf wird daher als repräsentativ für das gesamte Jahr angenommen. Das Leistungsmaximum beträgt 46,1 MW, der Energieverbrauch im Zeitraum 01.

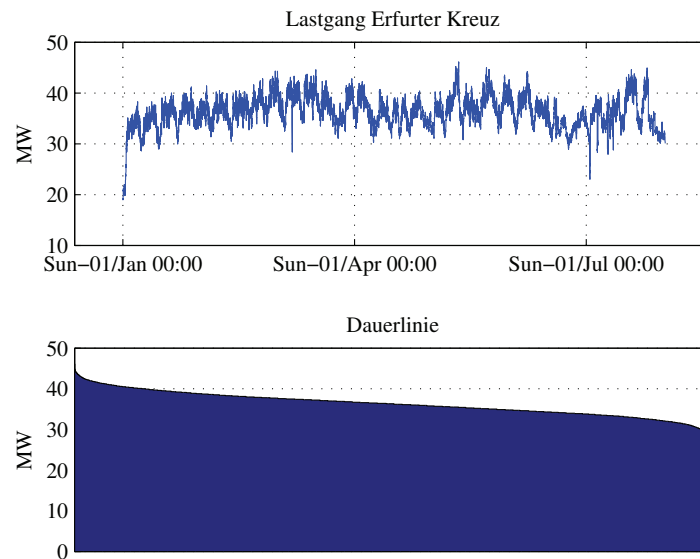


Abb. 1.1.: Ermittelter Lastgang und Jahresdauerlinie der Industriegrößfläche Erfurter Kreuz für den Zeitraum 01.01.2012-31.07.2012 anhand von 15-Minuten-Messwerten der E.ON Thüringer Energie AG. Für alle weiteren Betrachtungen im Rahmen dieser Studie wurden auf Basis dieser Messwerte Verbrauchsdaten für die Monate August bis Dezember synthetisch generiert.

Januar 2012 bis 31. Juli 2012 betrug rund 185,5 GWh. Unter der Annahme eines über das gesamte Jahr gleichförmig verlaufenden Lastgangs ergibt sich daraus ein jährlicher Energiebedarf von rund 318 GWh. Der durchschnittliche monatliche Energiebedarf beläuft sich demnach auf 26,5 GWh.

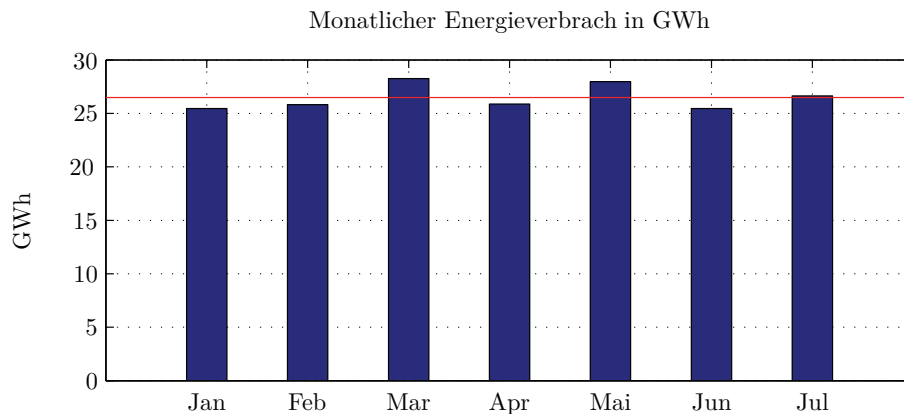


Abb. 1.2.: Monatlicher Energieverbrauch der Industriegrößfläche Erfurter Kreuz im Jahr 2012. Der durchschnittliche monatliche Energiebedarf (rote Linie) beträgt 26,5 GWh. Die Angaben basieren auf Messwerten der Monate Januar bis Juli 2012, die Werte für August bis Dezember wurden synthetisch generiert.

Der typische Lastgang für Haushaltsstromkunden weist in Industrienationen eine stark ausgeprägte Mittagsspitze (sog. Koch-Spitze) und eine etwas geringer ausgeprägte Spitze in den Abendstunden (sog. Fernseh-Spitze) aus. Im hier vorliegenden Fall handelt es sich jedoch um ein Industriegebiet,

welches kein typisches Lastgangverhalten in Abhängigkeit der Tageszeiten zeigt. Lediglich bei einer hohen Anzahl von Betrieben mit einem Einschichtsystem wäre ein erhöhter Tagesbedarf im Vergleich zu den Nachtzeiten zu erwarten. Anhand des vorliegenden Lastgangs ist dieser Fall nicht zu erkennen. Am Beispiel des Lastgangs vom 23. bis 29. April 2012 (Abb. 1.3) ist deutlich zu erkennen, dass die im Wochenverlauf auftretenden Lastspitzen alle zu unterschiedlichen Zeiten auftreten. Im konkreten Fall der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz bedeutet das, dass hier ein mehr oder minder stochastisches Lastspitzenbild entsteht. Das Lastprofil erfordert dabei in der Summe eine hohe Volllaststundenzahl des Erzeugerparks.

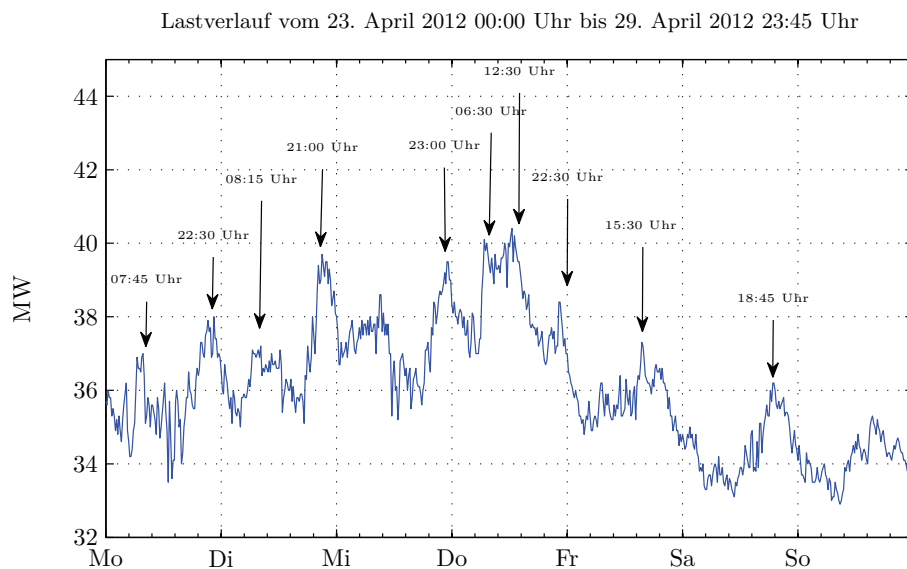


Abb. 1.3.: Lastverlauf vom 23. April bis 29. April 2012 (KW 17). Der Lastverlauf weist einen hohen Grundlastbedarf auf, tageszeitabhängige Charakteristika sind nicht zu erkennen.

1.2. Erneuerbare Energieproduktion

1.2.1. Erzeugerprofil Photovoltaik und Windenergie

Die Stromerzeugung mittels Photovoltaik- und Windenergieanlagen verläuft proportional zum Angebot von Sonnenstrahlung und Windgeschwindigkeit. Das Angebot von Wind und Sonnenstrahlung fluktuiert in Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit.

Photovoltaikanlagen liefern während des Sonnenhöchststandes, welcher an klaren Tagen dem Einstrahlungsmaximum entspricht, typischerweise ihre Maximalleistung. In Abb. 1.4 (oben) ist die stündliche Energieproduktion einer 1 MW_p Photovoltaikanlage am Standort Erfurt-Bindersleben¹ dargestellt. Das Erzeugerprofil entstammt einer Zeitschrittsimulation mit der Software PVSyst. Die Einstrahlungsdaten wurden der Datenbank Meteonorm entnommen und stellen den langjährigen Einstrahlungsmittelwert der Messperiode 1981-2000 dar. Der Verlauf weist in den Sommermonaten ein Maximum auf. In

¹Modulneigungswinkel: 30° , Azimut: 0° (Süden)

den Wintermonaten kann hingegen nur eine, der geringeren Einstrahlung entsprechenden, elektrischen Leistung bereitgestellt werden. Photovoltaikanlagen werden in Deutschland typischerweise mit einem

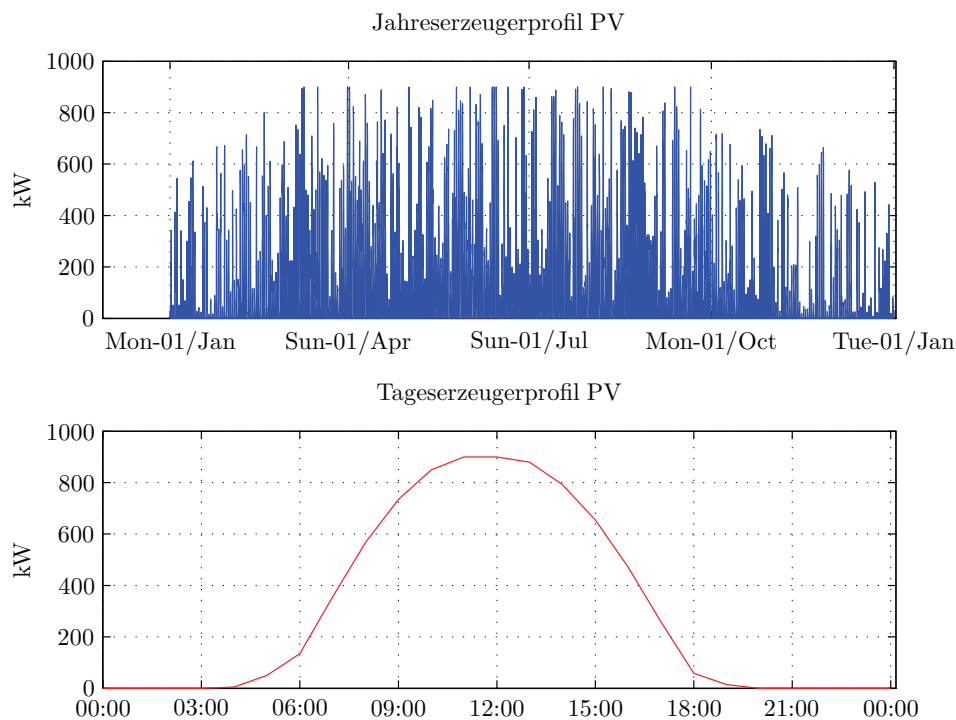


Abb. 1.4.: Typische Energieerzeugungsprofile einer Photovoltaikanlage (oben: Jahreserzeugerprofil, unten: Tageserzeugerprofil (Sommer))

fixen Modulneigungswinkel von 30° mit einem Azimutwinkel von 0° (Süden) ausgerichtet. Diese Ausrichtung ermöglicht es, im Laufe eines Jahres, mit einer fest ausgerichteten Photovoltaikanlage, einen optimalen Energieertrag zu erhalten. Die tägliche Energieproduktion einer Photovoltaikanlage zeigt erwartungsgemäß in der Mittagstunden ein Maximum (vgl. Abb. 1.4 unten). Wechselhafte Bewölkung kann dabei zu hohen Einstrahlungsschwankungen führen, die ebenfalls hohe Erzeugungsschwankungen nach sich ziehen. Alle Wetterdaten dieser Studie basieren auf langjährigen Mittelwerten in stündlicher Auflösung. Wechselhafte Einstrahlungen werden durch die Mittelwertbildung geglättet. Der Effekt von schnellen Einstrahlungsschwankungen kann im Rahmen dieser Studie daher nicht berücksichtigt werden.

Die durchschnittliche Windenergieerzeugung am Standort Erfurt-Bindersleben zeigt ein differenzierteres Bild. Die Maximalleistung scheint hier zunächst regelmäßig und unabhängig von der Jahreszeit aufzutreten (vgl. Abb. 1.5 oben). Der in Abb. 1.5 (unten) dargestellte Wochenverlauf zeigt, dass im Gegensatz zur Photovoltaik sowohl Tagsüber, als auch Nachts eine merkliche Energiebereitstellung erfolgt. Eine Analyse der stündlichen Monatsmittelwerte offenbart jedoch, dass ein konstantes Erzeugerprofil durch die Windkraft allein ebenfalls nicht zur Verfügung steht. Abb. 1.6 zeigt die auf die jeweilige maximale durchschnittliche Erzeugerleistung normierten Tagesgänge einer Photo-

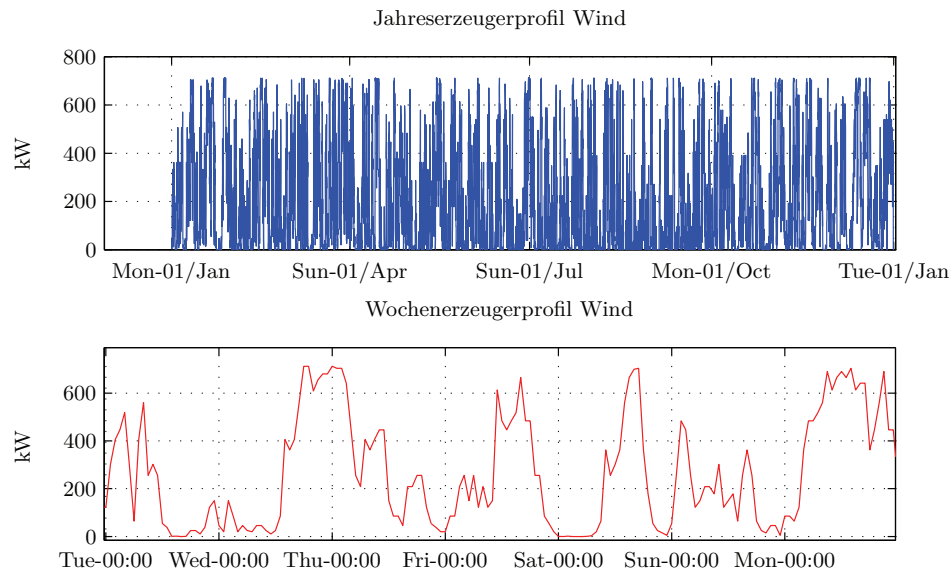


Abb. 1.5.: Typische Energieerzeugungprofile einer Windenergieanlage (oben: Jahreserzeugerprofil, unten: Wochenerzeugerprofil (Sommer))

voltaik²- und einer Windkraftanlage am Standort Erfurt-Bindersleben. Die Tagesgänge wurden auf Basis der o.g. Wetterdaten ermittelt. Die Windkraftanlage zeigt in den Wintermonaten eine deutlich

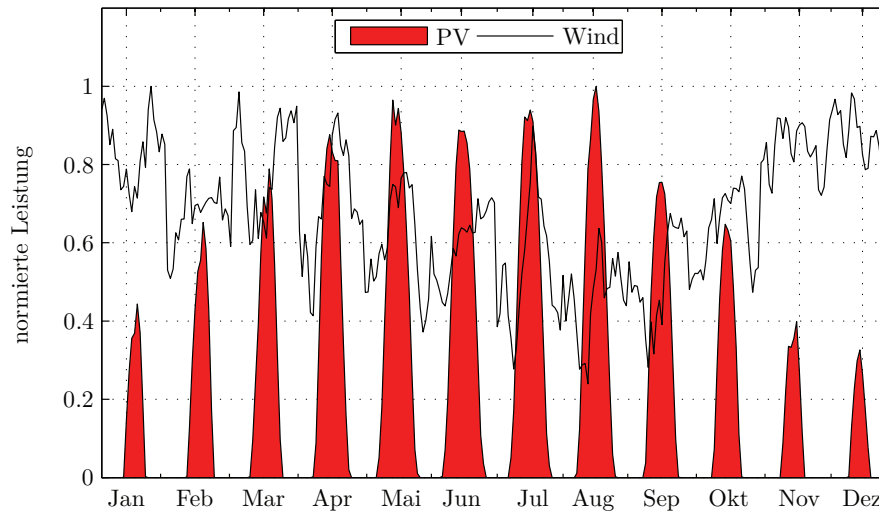


Abb. 1.6.: Monatsmittelwerte der durchschnittlichen Tagesgänge (normiert) einer Windenergieanlage und einer PV-Anlage am Standort Erfurt-Bindersleben.

höhere durchschnittliche Erzeugerleistung, wohingegen die Photovoltaikanlage in den Sommermonaten ihr Maximum erreicht. Die konträr verlaufenden mittleren Tagesgänge zeigen, dass sich diese beiden Technologien im Jahresverlauf gut ergänzen und bei einer entsprechenden räumlichen Verteilung der installierten Anlagenleistung theoretisch die Möglichkeit bieten, den in Abb. 1.1 dargestellten Lastgang

²Modulneigungswinkel: 30°, Azimut: 0° (Süden)

potenziell zu decken.

1.3. Stromgestehungskosten

Zur Deckung des elektrischen Energiebedarfs der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz ist ein Mix aus verschiedenen erneuerbaren Energieträgern erforderlich. Um ein wirtschaftlich sinnvolles Optimum des Erzeugermixes zu finden ist daher die Betrachtung der technologiespezifischen Stromgestehungskosten erforderlich. Grundlage bilden hierbei die zum 01. Januar 2013 geltenden Vergütungssätze des EEG. Aufgrund des fluktuierenden Energieangebots erneuerbarer Energieträger müssen Zeiten, an denen keine ausreichende Leistung bereitsteht, mit Hilfe von Speichern überbrückt werden. Folglich muss im Erzeugermix ebenfalls eine Speicherkomponente berücksichtigt werden. Die Speichergröße wird dabei anhand der Speicherkosten je kWh gespeicherter elektrischer Energie bewertet. Alternativ zur Speicherung wird die Möglichkeit untersucht, auftretende Versorgungslücken mit Hilfe von Biogasanlagen zu schließen.

1.3.1. Stromgestehungskosten Photovoltaik

Die Höhe der Vergütung von Strom aus Photovoltaikanlagen richtet sich nach der installierten Spitzenleistung³. Die Vergütungssätze von Strom aus Photovoltaikanlagen, die ab dem 01. Januar 2013 in Betrieb genommen wurden, sind in Tab. 1.2 aufgeführt. Für die Energieversorgung der Indus-

Tab. 1.2.: Vergütung von Strom aus Photovoltaikanlagen nach dem EEG bei Inbetriebnahme ab dem 01.01.2013.

Spitzenleistung	Vergütung in ct/kWh
Dachanlagen	
bis 10 kW _p	17,02
bis 40 kW _p	16,14
bis 1 MW _p	14,40
bis 10 MW _p	11,78
Freiflächenanlagen	
bis 10 MW _p	11,78

trießfläche Erfurter Kreuz wird davon ausgegangen, dass überwiegend Strom aus Freiflächenanlagen mit einer mittleren Leistung größer 1 MW_p zum Einsatz kommt. Die Stromgestehungskosten für Strom aus Photovoltaikanlagen werden in dieser Studie daher gem. Tab. 1.2 mit 11,78 ct/kWh angesetzt. Es wird ferner davon ausgegangen, dass der Strom von Photovoltaikanlagen auf Dach- oder Fassadenflächen zu den selben Kosten bereitgestellt werden kann.

³Die Spitzenleistung wird in W_p (Wattpeak) angegeben und entspricht der abgegebenen Leistung bei einer Einstrahlung von 1000 W/m², einer Zelltemperatur von 25 °C und dem Standardspektrum AM1,5.

1.3.2. Stromgestehungskosten Windenergie

Für die von Windenergieanlagen erzeugte elektrische Energie wird bei Inbetriebnahme ab dem 01. Januar 2013 in den ersten fünf Betriebsjahren eine Anfangsvergütung von 8,80 ct/kWh gezahlt. Erfüllen die Anlagen die Anforderungen der Systemdienstleistungsverordnung erhöht sich die Anfangsvergütung um 0,47 ct/kWh auf 9,27 ct/kWh. Die Grundvergütung nach den ersten Betriebsjahren beträgt dann 4,80 ct/kWh für Anlagen die ab dem 01. Januar 2013 in Betrieb genommen wurden. Die Frist zur Zahlung der Anfangsvergütung kann unter bestimmten Voraussetzungen nach dem EEG verlängert werden. Im Rahmen dieser Studie wird jedoch davon ausgegangen, dass eine Windenergieanlage nach Ablauf der 5 Jahresfrist auf Basis der Grundvergütung kostendeckend Strom liefern kann. Auf Grundlage der Dauer der Vergütungszahlung nach dem EEG von 20 Jahren ergibt sich daraus eine arithmetisch gemittelte Vergütung von 5,92 ct/kWh, welche in dieser Studie als Stromgestehungskosten für Strom aus Windenergieanlagen zu Grunde gelegt wird.

1.3.3. Stromgestehungskosten Biomasse

Der Begriff Biomasse umfasst im Sinne dieser Studie die Erzeugung von Biogas und die anschließende Verstromung des Biomethans. Dabei wird von einem durchschnittlichen Methangehalt von 52 Prozent ausgegangen. Zur Verstromung wird ein Blockheizkraftwerk (BHKW) mit einem elektrischen Wirkungsgrad von 40 Prozent angenommen. Die getroffenen Annahmen basieren auf Angaben in [6]. Die Nutzung der Abwärme wird hierbei nicht betrachtet.

Die Höhe der Vergütung von Strom aus Biomasseanlagen nach dem EEG richtet sich nach der elektrischen Nennleistung der Anlage, dem eingesetzten Substrat und einer etwaigen Gasaufbereitung. Im Rahmen dieser Studie ist mit einem hohen installierten elektrischen Leistungsbedarf zu rechnen, sodass für die Ermittlung der Stromgestehungskosten von einer Anlagenleistung von 20 MW_{el} ausgegangen wird. Dieser beträgt für im Jahr 2013 installierte Anlagen 5,88 ct/kWh. Dabei wird nur die Grundvergütung berücksichtigt. Die Verfügbarkeit von bonifähigen Gärstoffen kann an dieser Stelle nicht abgeschätzt werden.

Die Erzeugung von Biomethan erfolgt in sogenannten Fermentern. Dabei handelt es sich um Behälter, in denen der Gärprozess kontinuierlich⁴ abläuft. Das erzeugte Biogas kann in Gasspeichern zwischengespeichert und bedarfsgerecht zur Stromerzeugung eingesetzt werden. Diese Nutzungsvariante ermöglicht es, das erzeugte Biogas bei nicht vorhandener Sonnen- und Windenergie zur Bedarfsdeckung einzusetzen.

⁴Kontinuierlich bedeutet in diesem Zusammenhang, dass der Prozess im Jahresverlauf nicht unterbrochen wird. Die momentane Gasproduktion kann in Abhängigkeit der Fermenterbeschickung, der Substratzusammensetzung und der hydraulischen Verweilzeit schwanken, wird aber im Rahmen dieser Studie als konstant angenommen.

1.3.4. Speicherkosten

Die Speicherung von elektrischer Energie erfolgt typischerweise in Akkumulatoren. Für die Zwischenspeicherung überschüssiger elektrischer Energie aus erneuerbaren Energien werden dazu stationäre Batteriesysteme benötigt. Stand der Technik sind in diesem Segment derzeit noch Batterien auf Blei-Säure-Basis. Mittelfristig wird der Speicherung in Natrium-Schwefel-Batterien (NaS) ein großes Potenzial zugesprochen. Die Speicherkosten dieser beiden Technologien liegen derzeit noch bei durchschnittlich 16,00 ct/kWh [8].

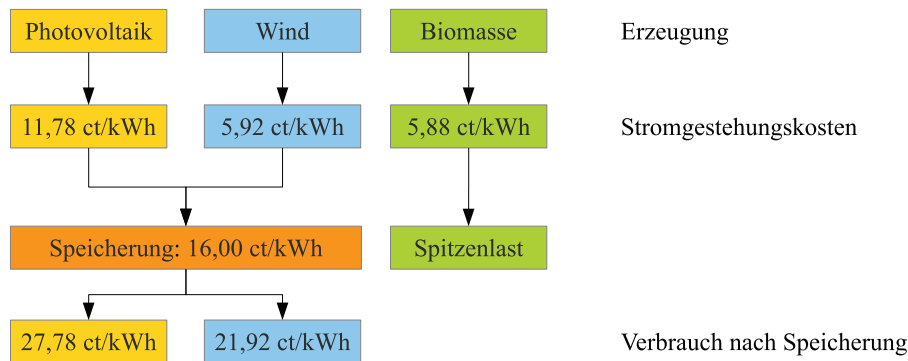


Abb. 1.7.: Stromgestehungskosten der drei eingesetzten erneuerbaren Energietechniken und nach der Speicherung entstehende Kosten.

Aufgrund der Umwandlung von elektrischer in (gespeicherte) chemische Energie in einer Batterie treten Verluste auf. Des Weiteren tritt bei Bleibatterien während der Speicherdauer eine sog. Selbstentladung ein. NaS-Batterien weisen keine bzw. nur eine sehr geringe Selbstentladung auf, müssen jedoch auf eine Betriebstemperatur von 300 °C aufgeheizt werden. Die dafür notwendige Energie muss ebenfalls im Speicherwirkungsgrad berücksichtigt werden. Die Verluste beider Technologien summieren sich auf rund 30 Prozent, sodass im Rahmen dieser Studie von einem durchschnittlichen Speicherwirkungsgrad von 70 Prozent ausgegangen wird.

Anhand der hier angenommenen Stromgestehungs- und Speicherkosten lassen sich folgende Schlussfolgerungen für die Energieversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz ableiten:

- Der Anteil direkt „verbrauchter“ Energie sollte möglichst hoch sein, da die Speicherkosten deutlich über den Stromgestehungskosten von Solar-, Wind- und Bioenergie liegen.
- In Zeiten schwacher Sonneneinstrahlung und Windgeschwindigkeiten sollte die resultierende Fehlleistung mit einem möglichst großem Anteil Biogas ausgleichen werden. Die Skalierung der dazu erforderlichen BHKW sollte in einem Leistungsbereich von max. 1 MW liegen, um einen ineffizienten Teillastbetrieb zu vermeiden.
- In Zeiten mit hoher Energieüberproduktion sollte die Energie aus Photovoltaikanlagen vorrangig direkt zur Bedarfsdeckung eingesetzt werden.
- Ein elektrochemischer Energiespeicher sollte mit einem möglichst hohem Windenergieanteil

geladen werden, da hier die Summe aus Stromgestehungs- und Speicherkosten am geringsten ist. Die gespeicherte Energiemenge sollte dabei so gering wie möglich sein.

Power to Gas stellt eine weitere Möglichkeit dar, überschüssige elektrische Energie in Form von chemisch gebundener Energie zu speichern. Dazu wird die Energie zunächst mittels Elektrolyse in Wasserstoff umgewandelt und kann in einem weiteren Verfahrensschritt und der Zuführung von CO_2 in Methan (CH_4) umgewandelt werden. Letzteres entspricht handelsüblichem Erdgas und kann problemlos in das bestehende Erdgasnetz eingespeist werden. Die Umwandlung in elektrische Energie kann dann in BHKW, analog zu Biogas, erfolgen. Derzeit betragen die Stromgestehungskosten für eine kWh elektrische Energie nach der Umwandlung in Methan rund 0,60 Euro. Solange die Speicherung in Batteriesystemen deutlich günstiger ist, stellt diese Methode keine wirtschaftliche Alternative zu bestehenden Speichertechnologien dar. Prinzipiell kann der Anteil der erforderlichen elektrischen Leistung aus Biomasse im Erzeugerpark durch diese Technologie ersetzt bzw. ergänzt werden.

2. Energieerzeugungspotenziale

2.1. Technisches Potenzial zur elektrischen Energiebereitstellung aus Photovoltaik, Windenergie und Biomasse

Die Industriegroßfläche Erfurter Kreuz befindet sich im unmittelbaren Bereich der Gemeinden Arnstadt und Ichtershausen¹. Das technische Potenzial zur elektrischen Energiebereitstellung aus Photovoltaik, Windenergie und Biomasse ist in Tab. 2.1 aufgeführt. Es steht demnach ein technisches

Tab. 2.1.: Technisches Energieerzeugungspotenzial in den Gemeinden Arnstadt und Ichtershausen [1].

	Photovoltaik	Windenergie	Biomasse	Gesamt
Arnstadt	111 GWh/a	60 GWh/a	8 GWh/a	179 GWh/a
Ichtershausen	46 GWh/a	11 GWh/a	7 GWh/a	64 GWh/a
Summe	157 GWh/a	71 GWh/a	15 GWh/a	243 GWh/a

Gesamtpotenzial von 243 GWh/a zur Verfügung. Die Energieversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz mit den in den Gemeinden Arnstadt und Ichtershausen vorhandenen, technisch nutzbaren Potenzialen ist unter den aktuellen Bedingungen eines elektrischen Energiebedarfs von 318 GWh/a nicht möglich. Ferner ist unter Annahme eines stetigen wirtschaftlichen Wachstums nicht mit einer Verringerung des elektrischen Energiebedarfs² der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz zu rechnen. Das nicht ausreichende Gesamtpotenzial in den beiden Gemeinden macht eine Ausweitung des Untersuchungsraumes erforderlich. Die technischen Potenziale zur Energieerzeugung auf Landkreisebene (Ilm-Kreis) und der Planungsregion Mittelthüringen sind in Tab. 2.2 aufgeführt. Der Ilm-Kreis bietet

Tab. 2.2.: Technisches Energieerzeugungspotenzial im Ilm-Kreis und in der Planungsregion Mittelthüringen nach [1].

	Photovoltaik	Windenergie	Biomasse	Gesamt
Ilm-Kreis	594 GWh/a	1.726 GWh/a	135 GWh/a	2.455 GWh/a
Mittelthüringen	3.098 GWh/a	11.692 GWh/a	957 GWh/a	15.747 GWh/a

demnach ein ausreichendes technisches Potenzial zur Deckung des elektrischen Energiebedarfs der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz, die Planungsregion Mittelthüringen folglich auch. Dabei darf der

¹Die Zusammenlegung der Gemeinde Ichtershausen und der Wachsenburggemeinde wird dabei nicht berücksichtigt.

²Selbst unter der Annahme stetiger Effizienzsteigerungen im Bereich der elektrischen Verbraucher ist in der Summe mit einer Energiebedarfssteigerung zu rechnen. Im optimalsten Fall wird ein gleichbleibender Energiebedarf erwartet.

elektrische Energiebedarf der übrigen Verbraucher in den entsprechenden Bereichen nicht außer Acht gelassen werden. Das technische Potenzial bezüglich der installierten Leistungen beläuft sich demnach auf 3.261 MW_p Photovoltaik, 5.846 MW Windenergie und eine installierte elektrische Biomasseleistung von 109 MW.

Die in Tab. 2.1 und Tab. 2.2 aufgeführten Werte stellen dabei die theoretische Energieproduktion dar, welche nach dem Stand der Technik und unter Berücksichtigung der verfügbaren Standorte möglich ist. Die tatsächlich zur Verfügung stehende Energiemenge ist abhängig von ökonomischen Rahmenbedingungen und der Ausbaugeschwindigkeit der Erzeugerkapazität. Die Ausbaugeschwindigkeit hängt dabei neben den ökonomischen Rahmenbedingungen auch von planungsrechtlichen Aspekten hinsichtlich der Flächennutzung, Abstandsregelungen und Schutzgebieten ab. Im Folgenden werden drei Ausbauszenarien vorgestellt, anhand derer die Möglichkeit zur vollständigen elektrischen Energieversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz untersucht wird.

2.2. Szenarienbasierte Potenzialausschöpfung

Die Bewertung der vorhandenen erneuerbaren Energiepotenziale wird auf Basis der drei Zukunftsszenarien der Ergebnisse der Potenzialanalyse „Neue Energie für Thüringen“ [1] durchgeführt. Die Szenarien gehen dabei von unterschiedlichen Ausbaugeschwindigkeiten aus, welche von sogenannten Stellschrauben abhängen. Diese werden in der hier vorliegenden Studie unverändert übernommen. Im Folgenden werden die Zukunftsszenarien und die dazugehörigen Stellschrauben kurz dargestellt, wobei sich auf die Annahmen bezüglich der elektrischen Energiebereitstellung und die dazu angenommenen Rahmenbedingungen beschränkt wird. Der Prognosehorizont erstreckt sich dabei bis zum Jahr 2050. Die nachfolgenden Ausführungen beziehen sich dabei auf die entsprechenden Erwartungspotenziale unter den angenommenen Rahmenbedingungen.

2.2.1. Referenzszenario

Der Ausbau der Photovoltaik wird hauptsächlich auf Dach- oder Fassadenflächen vollzogen. Freiflächenanlagen werden lediglich auf Brachflächen oder Deponien errichtet. Die Ausbaurrate folgt dabei den Ausführungen der Leitstudie 2010 [4].

Der Bau von Windkraftanlagen erfolgt nur in ausgewiesenen Windvorranggebieten der Regionalpläne und Konzentrationsflächen für Repowering. Altanlagen, welche älter als 15 Jahre sind, werden durch Anlagen mit einer Nennleistung von 3 MW ersetzt. Noch nicht ausgenutzte Windvorrangflächen werden mit einer Anlagengröße von 3 MW bestückt. Dabei wird eine Vollbenutzungsdauer von 1600 h/a angenommen. Es erfolgt keine Steigerung der Nutzung des Biogaspotenzials. Altanlagen bleiben in Betrieb.

2.2.2. Ambitioniertes Szenario

Bis zum Jahr 2050 werden 50 Prozent des zur Verfügung stehenden Potenzials an Dach- und Fassadenflächen zum Ausbau der Photovoltaik genutzt. Freiflächenanlagen werden ausschließlich auf Brach- und Deponieflächen errichtet.

Der Ausbau der Windenergie erfolgt unter Berücksichtigung der generellen Restriktionen und bestehender Abstandsregelungen auf allen windhöffigen Flächen. Waldflächen ohne Schutzstatus werden in die Potenzialflächen mit eingerechnet. Das verfügbare Potenzial wird bis 2050 komplett ausgenutzt. Bis zum Jahr 2020 erfolgt der Zubau mit einer Anlagengröße von 3 MW, danach mit 4 MW. Das Biogaspotenzial wird um 20 Prozent ausgebaut.

2.2.3. Exzellenzszenario

Die Ausschöpfung des Dach- und Fassadenflächenpotenzials zur photovoltaischen Nutzung steigt auf 90 Prozent. Freiflächenanlagen werden ausschließlich auf Brach- und Deponieflächen errichtet.

Der Ausbau der Windenergie erfolgt wie im ambitionierten Szenario unter Beachtung geltender Abstandsregelungen und Restriktionen. Jedoch wird hier eine Lockerung der Restriktionen in Wasserschutz- und Landschaftsschutzgebieten sowie Naturparks angenommen. Das verfügbare Potenzial wird bis 2050 komplett ausgenutzt. Bis zum Jahr 2020 erfolgt der Zubau mit einer Anlagengröße von 3 MW, danach mit 4 MW. Das Biogaspotenzial wird um 20 Prozent ausgebaut.

2.3. Prognostizierte verfügbare Potenziale

Das verfügbare technische Potenzial direkt in den betreffenden Gemeinden Arnstadt und Ichtershausen ist nicht ausreichend, um den elektrischen Energiebedarf der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz zu decken.

Das erwartete Erzeugungspotenzial auf Landkreisebene zeigt, dass hier lediglich unter den Annahmen des Exzellenzszenarios bis zum Jahr 2020 eine Versorgung der Industriegroßfläche möglich wäre.

Tab. 2.3.: Prognostizierter Strombedarf und verfügbares Energieerzeugungspotenzial im Ilm-Kreis nach [1] im Jahr 2020.

	Photovoltaik in GWh/a	Windenergie in GWh/a	Biomasse in GWh/a	Gesamt in GWh/a	Strombedarf in GWh/a
Referenzszenario	41	42	58	141	694
Amb. Szenario	85	140	60	285	546
Exzellenzszenario	142	559	65	766	561

Weder die Rahmenbedingungen im Referenzszenario noch die im ambitionierten Szenario erlauben eine hundertprozentige Stromversorgung mit erneuerbaren Energien der Industriegroßfläche Erfurter

Kreuz, insbesondere wenn man dem Erzeugungspotenzial den prognostizierten Strombedarf des gesamten Landkreises gegenüber stellt (vgl. Tab. 2.3).

Eine weitere Ausweitung des Untersuchungsgebiets auf die Planungsregion Mittelthüringen zeigt, dass die Rahmenbedingungen des Referenzszenarios bis zum Jahr 2050 nicht ausreichen, um die Stromversorgung der Industriegroßfläche abzusichern. Auch hier ist der prognostizierte Strombedarf in der gesamten Planungsregion größer als die Stromerzeugung (vgl. Tab. 2.4). Im ambitionierten Szenario und im Exzellenzszenario kann der Strombedarf im Jahr 2020 in der Planungsregion durch erneuerbare Energien gedeckt werden³. Die Energiebereitstellung liegt in beiden Szenarien deutlich über dem Strombedarf.

Tab. 2.4.: Prognostizierter Strombedarf und prognostizierte Stromerzeugung in der Planungsregion Mittelthüringen nach [1].

	Photovoltaik in GWh/a	Windenergie in GWh/a	Biomasse in GWh/a	Gesamt in GWh/a	Strombedarf in GWh/a
bis zum Jahr 2020					
Referenzszenario	256	889	303	1.448	3.869
Amb. Szenario	445	2.928	317	3.690	3.080
Exzellenzszenario	747	4.083	351	5.181	3.112
bis zum Jahr 2050					
Referenzszenario	406	1.408	763	2.577	3.938
Amb. Szenario	1.581	7.968	822	10.371	2.300
Exzellenzszenario	2.788	11.692	957	15.707	2.426

Die prognostizierte Stromerzeugung der einzelnen Szenarien entspricht dabei der Energiemenge, welche unter den genannten Voraussetzungen zu einem bestimmten Zeitpunkt zur Verfügung steht. Sie spiegeln somit das sogenannte Erwartungspotenzial wieder. Die prognostizierte Stromerzeugung im Jahr 2050 gem. Tab. 2.4 entspricht dabei dem technischen Potenzial, wobei für die Stromerzeugung aus Photovoltaik nur eine 90 prozentige Potenzialausnutzung angenommen wurde.

³Hier wurden die Werte des ambitionierten Szenarios B und des Exzellenzszenarios B nach [1] verwendet. Danach unterliegen die Annahmen zum Strombedarf einer Effizienzsteigerung auf Verbraucherseite.

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

3.1. Summarische Bedarfsdeckung

3.1.1. Energiebedarf

Die Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität erfolgt anhand der gemessenen 15-Minutenwerte der drei Umspannwerke im Versorgungsgebiet. Die Messwerte liegen dabei nur für den Zeitraum Januar bis Juli vor. Der Lastgang zeigt dabei kein saisonales Verhalten. Anhand der Messwerte wurde daher der Lastgang auf das gesamte Jahr ausgedehnt. Aufgrund der stündlich vor-

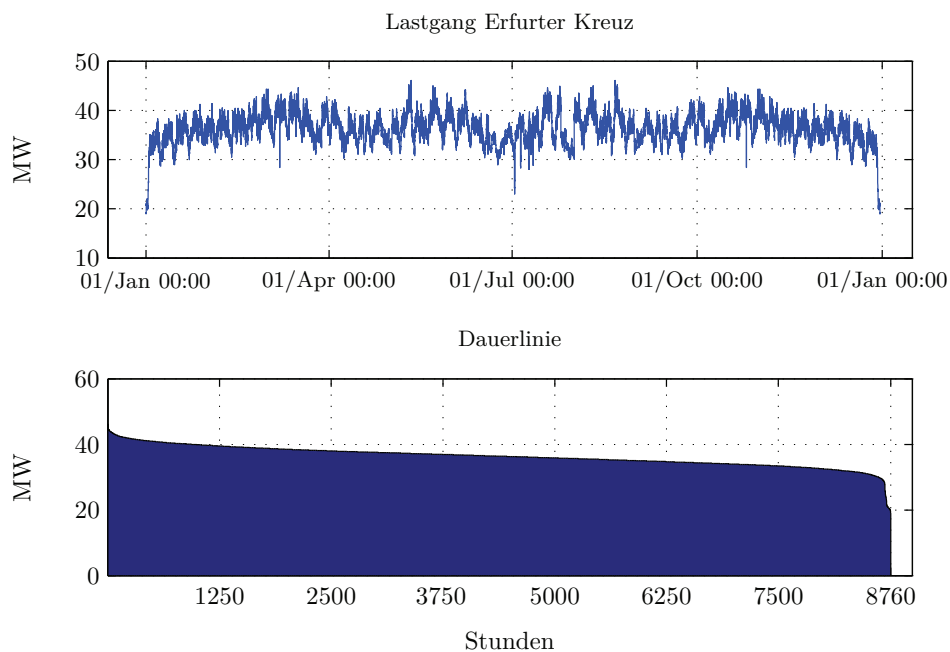


Abb. 3.1.: Synthetisch auf ein Jahr erweiterter Lastgang (oben) und Dauerlinie (unten) der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz.

liegenden Wetterdaten werden die 15-Minutenmesswerte auf stündliche Werte gemittelt. Der Lastgang wird dadurch leicht geglättet, behält dabei aber seine ursprüngliche Charakteristik.

Der jährliche Energiebedarf¹ beläuft sich auf rund 318 GWh. Um diese Energie im Jahresmittel zur Verfügung zu stellen, wäre rechnerisch ein Kraftwerk mit einer Vollbenutzungsdauer² von 8760 h/a

¹Hochrechnung auf ein Jahr, auf Basis der Messwerte von Januar bis Juli 2012.

²d.h. die Zeit, die eine Erzeugungsanlage zur Erzeugung der Energiemenge benötigt, wenn sie mit Nennleistung laufen würde. [10]

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

und einer Nennleistung von 36,3 MW erforderlich.

3.1.2. Energiebereitstellung mittels Photovoltaik

Erneuerbare Energieträger weisen aufgrund des fluktuierenden Angebots von Sonne und Wind eine deutlich geringere Vollbenutzungsdauer auf. Für diese Studie wurde im Rahmen einer Vordimensionierung eine charakteristische Photovoltaikanlage zusammengestellt.

Tab. 3.1.: Kennwerte der zugrunde gelegten Photovoltaikanlage

Kenngröße	Wert
Spitzenleistung	1003 kW _p
mittlerer spez. Jahresertrag	950 kWh/kW _p
Vollbenutzungsdauer	950 h/a
Systemwirkungsgrad ³	13,0 %
Azimut	0° (Süden)
Modulneigung	30°
Verschattung	keine

Der spezifische Jahresertrag beläuft sich auf rund 950 kWh/kW_p, die Vollbenutzungsdauer auf 950 h/a. Mit dieser Vollbenutzungsdauer kann die erforderliche, zu installierende Leistung wie folgt berechnet werden:

$$P_{PV} = \frac{\text{Energiebedarf}}{\text{Vollbenutzungsdauer}} \quad (3.1)$$

Danach wäre zur summarischen Deckung des Energiebedarfs mit Photovoltaikanlagen eine Leistung von rund 335 MW_p zu installieren. Die sich mit den mittleren Einstrahlungswerten ergebende Jahresdauerlinie einer installierten Photovoltaikleistung von 335 MW_p ist in Abb. 3.2 dargestellt. Der Energiebedarf kann nur an 2475 Stunden im Jahr direkt durch Photovoltaikanlagen gedeckt werden. In dieser Zeitspanne muss zusätzlich die während des restlichen Jahres benötigte Energie erzeugt und gespeichert werden. Aufgrund der nur tagsüber vorhandenen Sonneneinstrahlung und der notwendigen, deutlichen Überdimensionierung des Erzeugerparks ergibt sich eine zur zeitlichen Deckung des Energiebedarfs erforderliche Speicherkapazität von rund 205 GWh, d.h. annähernd zwei Drittel des Jahresenergiebedarfs. Die Stromgestehungskosten für diese 205 GWh erhöhen sich dann um die entsprechenden Speicherkosten von 16 ct/kWh auf 27,78 ct/kWh, was jährlichen Mehrkosten von 32,8 Mio. Euro gegenüber der direkten Nutzung entspricht.

³Der Systemwirkungsgrad umfasst alle Verluste einer Photovoltaikanlage, von der einfallenden Sonnenstrahlung auf der Moduloberfläche bis zu den Ausgangsklemmen des Wechselrichters. Verluste während des Energietransports vom Wechselrichter zum Verbraucher sind darin nicht enthalten und müssen gesondert als Übertragungsverluste ausgewiesen werden.

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

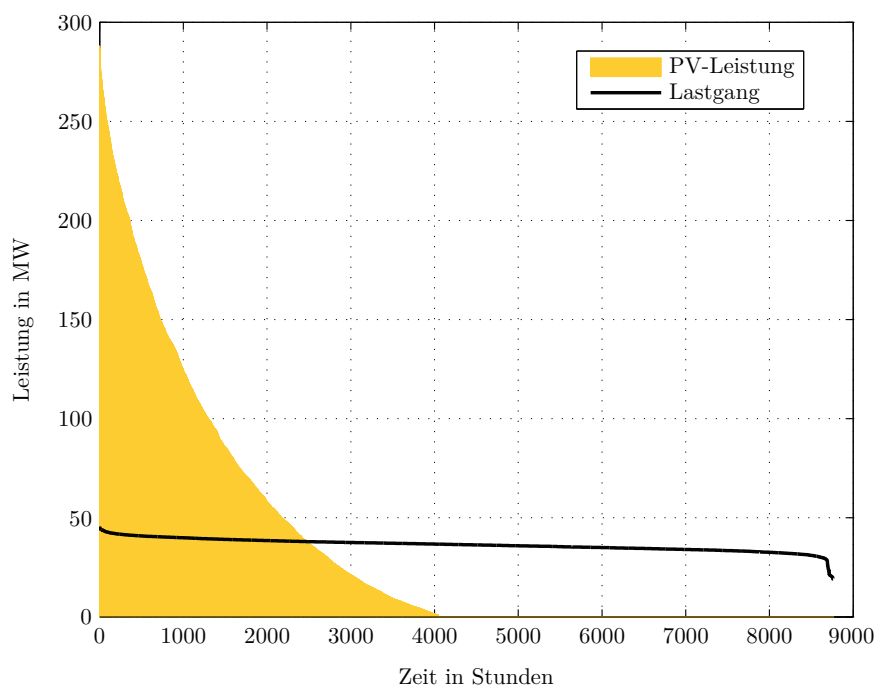


Abb. 3.2.: Dauerlinie des Energiebedarfs und der Photovoltaikenergieerzeugung bei einer installierten Photovoltaikleistung von 335 MW_p .

3.1.3. Energiebereitstellung mittels Windenergie

Zur Deckung des Energiebedarfs mittels Windenergieanlagen wurde eine charakteristische Anlage mit einer Nennleistung von 3 MW gem. Tab. 3.2 angenommen. Die mittlere Jahreswindgeschwindigkeit erreicht mit $4,5 \text{ m/s}$ einen vergleichsweise geringen Wert⁴. Anhand der mittleren Jahreswindgeschwindigkeit und der dazugehörigen Anlagenkennlinie (Abb. 3.3) ergibt sich eine Vollbenutzungsdauer der Anlage von 1600 h/a . Zur vollständigen summarischen Deckung des Energiebedarfs durch Windenergieanlagen wäre demnach eine Nennleistung von insgesamt 199 MW erforderlich.

Tab. 3.2.: Kennwerte der zugrunde gelegten Windenergieanlage

Kenngröße	Wert
Nennleistung	3000 kW_p
Nabenhöhe	100 m
mittlere Windgeschwindigkeit in Nabenhöhe v_m	$4,5 \text{ m/s}$
Vollbenutzungsdauer	1600 h/a

Die Häufigkeitsverteilung der mittleren Windgeschwindigkeit ist in Abb. 3.3 zusammen mit der für die Ermittlung der Vollbenutzungsdauer zugrunde gelegten Anlagenkennlinie dargestellt. Abb. 3.4 zeigt die sich ergebende Jahresdauerlinie der Windenergieerzeugung mit einer installierten Leistung von 199 MW . Daraus wird ersichtlich, dass an über 3440 Stunden im Jahr die aus Windenergieanlagen bereit-

⁴Gute Binnenstandorte weisen eine mittlere Jahreswindgeschwindigkeit von $5,5 \text{ m/s}$ auf [7].

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

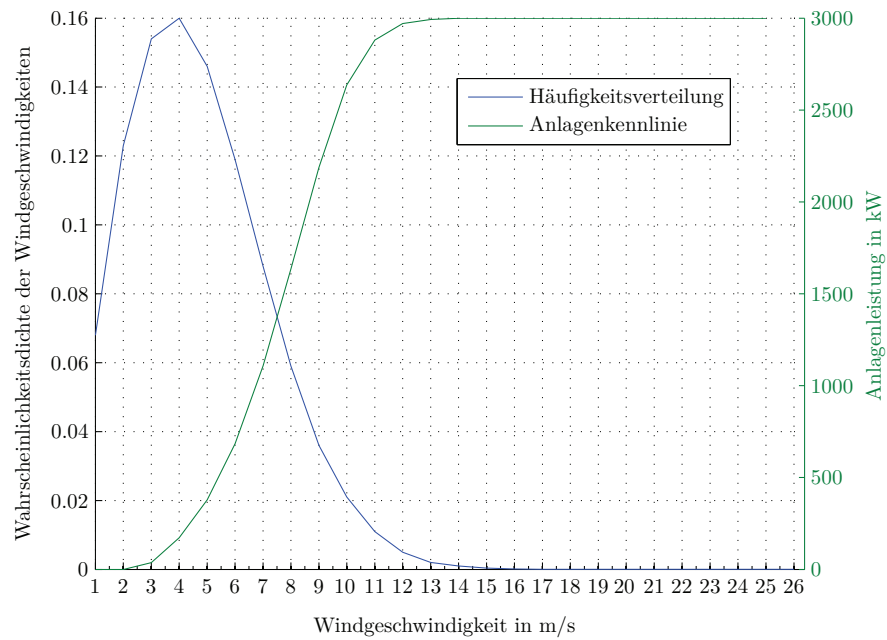


Abb. 3.3.: Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit für den Standort Erfurt-Bindersleben in einer Höhe von 100m ($v_m=4,5$ m/s) und Anlagenkennlinie einer 3 MW Windenergieanlage in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit.

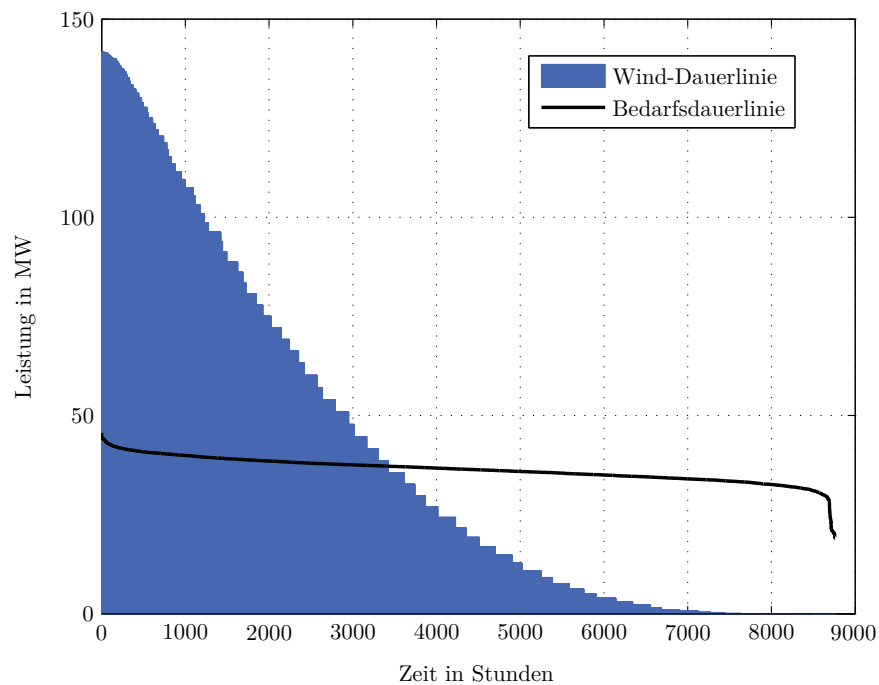


Abb. 3.4.: Dauerlinie des Energiebedarfs und der Windenergieerzeugung bei einer installierten Windleistung von 199 MW.

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

gestellte Leistung über dem Energiebedarf liegt. Um Energieerzeugung und Energiebedarf in einen zeitlichen Einklang zu bringen, ist ein Speicherbedarf von rund 172,15 GWh erforderlich. Gegenüber der direkten Nutzung der elektrischen Energie aus Windenergieanlagen ergeben sich für die zeitlich versetzte Nutzung der gespeicherten Energie aus Windenergieanlagen Mehrkosten von 27,5 Mio. Euro jährlich.

3.1.4. Energiebereitstellung mittels Biogas

Tab. 3.3.: Durchschnittliche Biogasausbeute für verschiedene Substrate [11] und jährlicher Substratbedarf (Frischmasse) für eine Fermenterleistung von 10 MW_{el}. Die genaue Biogasausbeute hängt stark vom jeweiligen Substrat und deren Zusammensetzung ab. Die angegebenen Werte dienen nur als Richtwert. (oTM= organische Trockenmasse, FM=Frischmasse)

Substrat	oTM in % FM	Biogas in m ³ / kg _{oTM}	Substratbedarf in t _{FM} /a
Rindergülle	8,2	0,28	779.721
Schweinegülle	4,2	0,40	1.065.618
Maissilage	30	0,60	99.458
Hühnermist	60	0,50	59.675
Grassilage	35,5	0,58	86.947
Roggensilage	37	0,60	80.641
Biertreber	22	0,53	153.537
Getreideschlempe	5,7	0,64	490.746

Durch die Fermentation von Biomasse gewonnenes Biogas wird in Blockheizkraftwerken in Strom umgewandelt. Dabei handelt es sich um stationär betriebene Verbrennungsmotoren. Der elektrische Wirkungsgrad eines Gasmotors wird im Rahmen dieser Studie mit 40 Prozent angenommen. Des Weiteren wird eine Vollbenutzungsdauer von 8760 h/a unterstellt. Um den Energiebedarf summarisch mittels Biogas zu decken, ist eine Fermenterleistung von 36,3 MW_{el} erforderlich, was in etwa der gesamten installierten elektrischen Leistung aus Biomasse in der Planungsregion Mittelthüringen entspricht [1]. Diese Fermenterleistung würde eine stündliche Gasproduktion von 7418,74 m³/h Biogas erfordern⁵. Der Gasertrag einer Biogasanlage hängt dabei stark vom eingesetzten Substrat ab. In Tab. 3.3 sind dazu die durchschnittlichen Biogasausbeuten verschiedener Substrate und der daraus ableitbare jährliche Substratbedarf für eine Fermenterleistung von 10 MW_{el} aufgeführt.

⁵Mit einem Methangehalt von 52 Prozent und einem Heizwert von Methan in Höhe von 9,41 kWh/m³.

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

Tab. 3.4.: Kennwerte für eine beispielhafte Biogasanlage mit einer elektrischen Nennleistung von 20 MW.

Kenngröße	Wert
Fermenterleistung	20 MW _{el}
Gasproduktion	4086,32 m ³ /h
Methangehalt	52%
Heizwert Methan	9,41 kWh/m ³
BHKW Wirkungsgrad (el.)	40 %

Die Biogasproduktion erfolgt kontinuierlich, die Verstromung bedarfsorientiert. Daher muss ein ausreichend großer Gasspeicher zur Zwischenspeicherung des Biogas vorgehalten werden. Für die Verstromung des Biogases wird eine durchschnittliche BHKW Leistung von 1 MW_{el} angenommen. Der Betrieb erfolgt dabei in Abhängigkeit des momentanen Energiebedarfs. Die Kennwerte für eine beispielhafte Biogasanlage mit einer elektrischen Nennleistung von 20 MW sind exemplarisch in Tab. 3.4 aufgeführt. In Abb. 3.5 ist das Einsatzprinzip der Biogasanlagen bzw. der BHKW dargestellt. Liefert Photovoltaik und Windkraft nicht genügend Energie um den Bedarf zu decken, wird das gespeicherte Biogas in einer entsprechend großen Anzahl von BHKW in elektrische Energie umgewandelt, um die Bedarfslücke zu schließen.

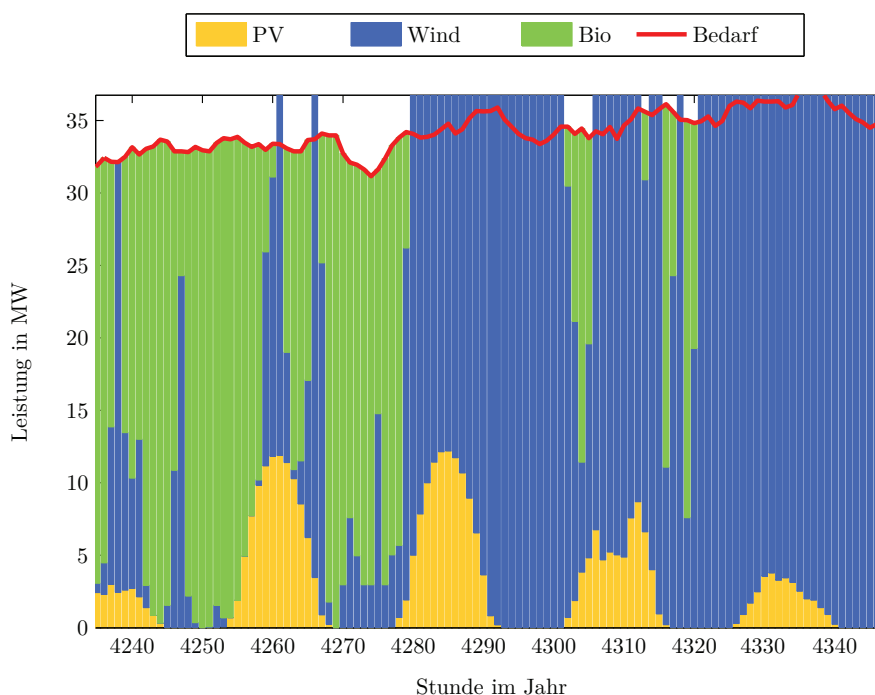


Abb. 3.5.: Auszug aus dem Energiebedarfs- und Erzeugungslastgang mit einer installierten Leistung von 15 MW_p Photovoltaik, 199 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biogas.

Kann nicht ausreichend Biogas zur Verfügung gestellt werden, muss die entstehende Versorgungslücke durch einen Batteriespeicher geschlossen werden. Die Bedarfsdeckung erfolgt dabei wieder vorrangig

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

durch einen Direktverbrauch von Photovoltaik- und Windstrom. Tritt eine Versorgungslücke auf, wird die maximal mögliche Anzahl von BHKW eingesetzt um die Lücke zu schließen. Das Funktionsprinzip ist in Abb. 3.6 dargestellt. Ist nicht genügend Biogas im Speicher vorhanden, wird der noch fehlende Restbedarf durch die im Batteriespeicher vorhandene Energiemenge gedeckt. Der Batteriespeicher wird dabei bis zu seiner maximalen Kapazität mittels Überschussenergie geladen. Ist der Batteriespeicher mit der maximalen Energiemenge geladen, wird die überschüssige Energie nicht genutzt. D.h. die Erzeugungsanlagen werden in einem niedrigeren Arbeitspunkt betrieben.

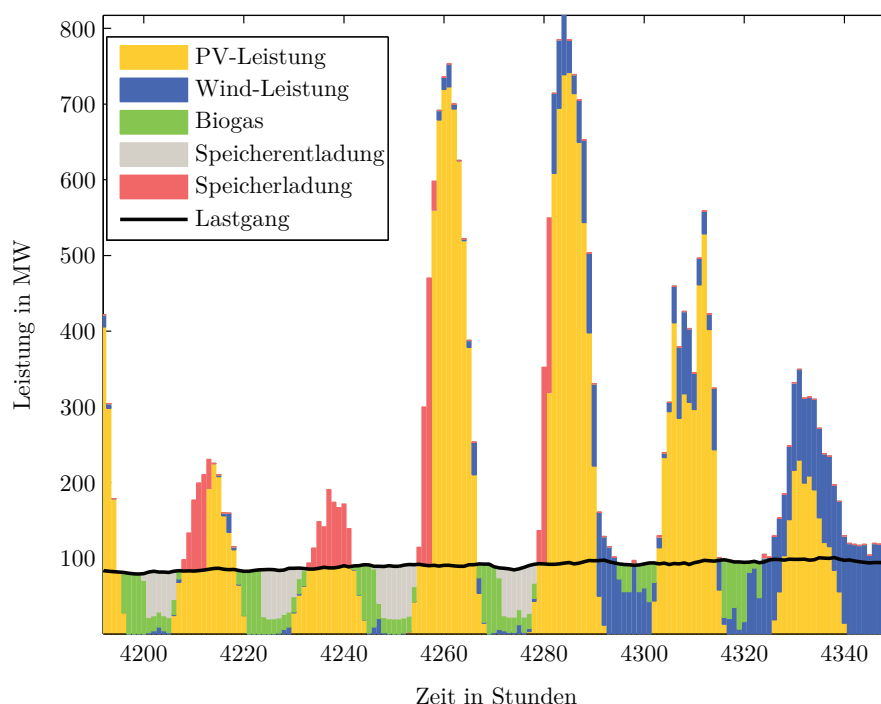


Abb. 3.6.: Auszug aus dem Energiebedarfs- und Erzeugungslastgang mit einer installierten Leistung von 912 MW_p Photovoltaik, 168 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biogas. Für diese Darstellung wurde eine Energiebedarfssteigerung auf 866 GWh/a angenommen. Dadurch entsteht ein erhöhter Leistungsbedarf von Photovoltaik- und Windenergieanlagen (vgl. Abschn. 3.2.4).

3.2. Erzeugermix

Die Deckung des Energiebedarfs mit nur einem erneuerbaren Energieträger ist nicht praktikabel. Das Maximum der Energiebereitstellung durch Photovoltaikanlagen liegt in den Sommermonaten, wohingegen in den Wintermonaten eine deutlich geringere Energiemenge bereitgestellt wird. Im Fall der Windenergie zeigt sich ein umgekehrtes Bild. Das Maximum der Windenergiebereitstellung erfolgt in den Wintermonaten, in den Sommermonaten tritt ein geringeres Windaufkommen in Erscheinung. Die energetisch und ökonomisch günstigere Variante der Energiebedarfsdeckung stellt eine Nutzung ohne Zwischenspeicherung dar, da hier auftretende Umwandlungsverluste vermieden werden (vgl. Abschn. 1.3). Aufgrund der diskontinuierlichen Energieproduktion wird für die Gewährleistung der Versorgungssicherheit eine Speicherkomponente erforderlich sein. Der Speicher muss dabei min-

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

destens die Energiemenge bereitstellen, welche zur Überbrückung der voraussichtlich längsten Phase ohne Wind und nutzbarer Sonneneinstrahlung erforderlich ist. Aus dieser Forderung ergeben sich zwei Möglichkeiten. Eine auftretende Versorgungslücke wird mit Energie aus Batteriespeichern geschlossen. Die Batteriespeicher werden dabei mit vorher erzeugtem Überschussstrom aufgeladen. Die Speicherkapazität wird anhand der im Jahresverlauf auftretenden größten Versorgungslücke ermittelt. Ein hoher Speicherbedarf zieht dabei hohe Speicherkosten nach sich. Je höher die installierte Leistung von Photovoltaik und Windenergie ist, desto geringer wird der Speicherbedarf ausfallen. In der Summe wird dabei jedoch auch ein großer Anteil von Energie erzeugt, der nicht direkt genutzt oder gespeichert werden kann.

Im zweiten Fall wird der Erzeugerpark durch Biomasseanlage ergänzt. Die Energiebereitstellung aus Biomasse erfolgt konstant über das gesamte Jahr und kann vergleichsweise einfach gespeichert werden. Die Umwandlung des Biogas⁶ in elektrische Energie erfolgt mittels BHKW mit einer Nennleistung von jeweils 1 MW. Zur Absicherung der Versorgungssicherheit wird zudem bei dieser Variante ebenfalls ein Batteriespeicher eingesetzt.

3.2.1. Ermittlung des Versorgungsgrads

Ziel dieser Studie ist die hundertprozentige Energieversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz mit erneuerbaren Energien. Der Erzeugerpark muss folglich in der Lage sein, den Energiebedarf zu jedem Zeitpunkt im Jahr zu decken. Die Übereinstimmung von Energieerzeugung und -bedarf wird anhand des Versorgungsgrads überprüft. Er wird aus den einzelnen Stundenwerten des Energiebedarfs und der Summe der zur Verfügung stehenden Energie aller Erzeuger und Speicher gebildet.

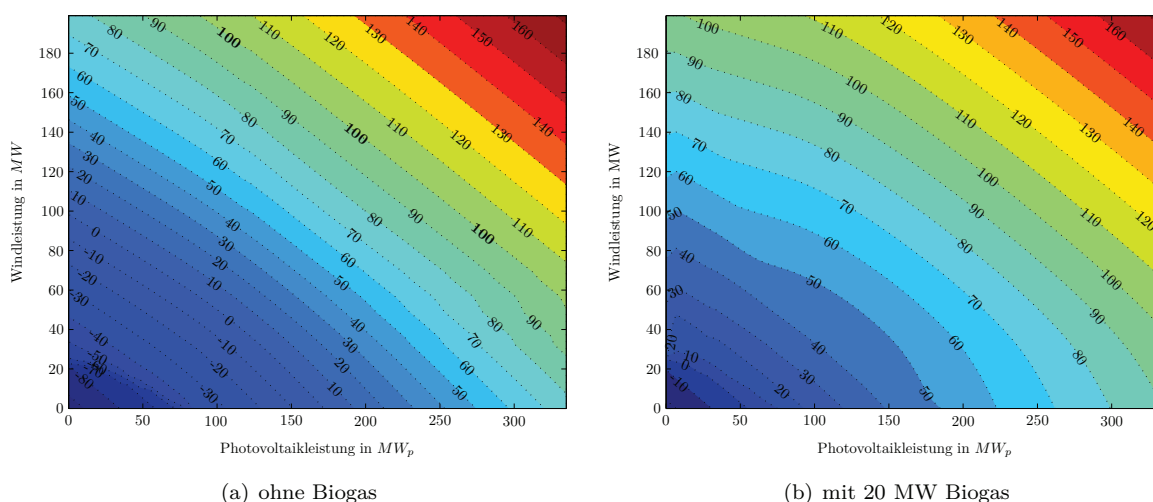


Abb. 3.7.: Versorgungsgrad (in Prozent) in Abhängigkeit der installierten Leistung von Photovoltaik- und Windenergieanlagen sowie Biogas zur Spitzenlastdeckung.

In einem ersten Untersuchungsschritt wurden die Versorgungsgrade in Abhängigkeit der installierten

⁶Es wird davon ausgegangen, dass hier ausschließlich Biomasse als Biogas genutzt wird.

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

Leistung von Photovoltaikanlagen und Windenergieanlagen berechnet. Das Ergebnis ist in Abb. 3.7(a) dargestellt. Die Abbildung macht deutlich, dass eine Deckung des Energiebedarfs mit nur einem Energieträger nicht möglich ist. Auch die Ergänzung des Erzeugerparcs durch Biomasseanlagen mit einer Leistung von 20 MW macht den Einsatz eines der beiden Energieträger Sonne oder Wind nicht überflüssig (vgl. Abb. 3.7(b)). Die notwendige Summe der zu installierenden Leistung sinkt dadurch jedoch deutlich.

3.2.2. Bedarfsdeckung mit einem Mix aus Photovoltaik, Windenergie ohne Biogas

Die sich ergebenden Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der installierten Leistung und der sich einstellende Versorgungsgrad sind in Abb. 3.8 dargestellt. Bei der Kostenbewertung sind dabei die Bereiche mit Versorgungsgraden kleiner 100 Prozent nicht zu berücksichtigen. Aufgrund der Kostenstruktur (vgl. Abschn. 1.3) ergeben sich bei hohen Anteilen von Windenergie geringere Kosten, im Vergleich zu höheren Anteilen von Energie aus Photovoltaikanlagen. Das Kostenminimum für die

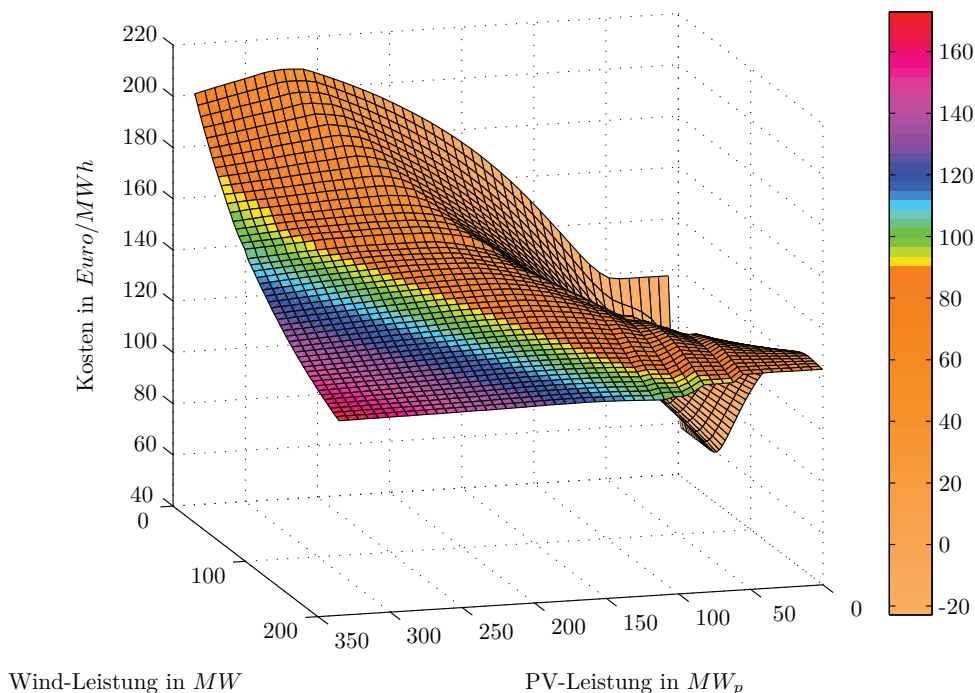


Abb. 3.8.: Gesamtstromgestehungskosten in Abhängigkeit der installierten Leistung und des Versorgungsgrades, ohne Biomasse. Die Farbskala gibt den Versorgungsgrad in Prozent an.

gewählten Rahmenbedingungen ergibt sich bei maximaler Photovoltaik- und Windleistung. Die Energieproduktion dieser Konstellation kann den doppelten Energiebedarf decken. Die Abregelung der Energieerzeugungsanlagen bei Überproduktion ist dabei deutlich günstiger im Vergleich zur Speicherung in Batteriesystemen. Weiterhin ist bei dieser Variante die geringste Speicherkapazität erforderlich.

Tab. 3.5.: Gesamtstromgestehungskosten (Auszug) in Abhängigkeit der installierten Leistung und des Versorgungsgrades, ohne Biomasse.

Variante	PV Leistung in MW _p	Wind Leistung in MW	Gesamtleistung in MW	Kosten in Euro/MWh
hoher PV Anteil	335	61	396	157,90
Medium (PV/Wind)	246	110	356	141,40
hoher Wind Anteil	109	199	308	115,90
Maximum (PV/Wind)	335	199	534	115,70

3.2.3. Bedarfsdeckung mit einem Mix aus Photovoltaik, Windenergie und Biogas

Im Jahr 2010 waren in Mittelthüringen 149 GWh aus Biomasse verfügbar. Mit einer Vollbenutzungsdauer von 8760 h/a ergibt sich eine installierte Leistung von 17 MW_{el}, bis zum Jahr 2020 ist mit einer Verdoppelung der Leistung zu rechnen [1]. Es wird angenommen, dass diese Energie vollständig als Biogas zur Verfügung steht und dezentral in BHKW mit einer Leistung von 1 MW in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Um den Energiebedarf im worst-case⁷ zu decken, wird ferner eine installierte Gesamt-BHKW-Leistung von 46 MW_{el} angenommen. Das nicht unmittelbar genutzte Biogas wird dabei in Gasdruckspeichern oder im Erdgasnetz zwischengespeichert und steht bei Bedarf unmittelbar zur Verfügung. Für diese Rahmenbedingungen ergeben sich die in Abb. 3.9 dargestellten Stromgestehungskosten in Abhängigkeit der installierten Photovoltaik- und Windleistung. Analog zu den Betrachtungen ohne Erzeugerleistung aus Biomasse werden hier die Bereiche mit einem Versorgungsgrad unter 100 Prozent vernachlässigt. Aufgrund des zusätzlichen Erzeugungsanteils durch

Tab. 3.6.: Gesamtstromgestehungskosten (Auszug) in Abhängigkeit der installierten Leistung und des Versorgungsgrades, mit 20 MW_{el} Biomasse bei einem Energiebedarf von 318 GWh. Die Gesamtleistung bezieht sich nur auf Photovoltaik und Windenergie.

Variante	PV Leistung in MW _p	Wind Leistung in MW	Gesamtleistung in MW	Kosten in Euro/MWh
hoher PV Anteil	335	41	376	94,88
Medium (PV/Wind)	198	130	328	81,21
hoher Wind Anteil	15	199	213	61,66
Maximum (PV/Wind)	335	199	534	83,51

Biomasse sinkt der Speicherbedarf des Batteriesystems. Die Folge ist eine deutliche Reduktion der resultierenden Stromgestehungskosten. Im Vergleich zur Variante ohne Biomasseanteil, treten hier ebenfalls tendenziell geringere Stromgestehungskosten bei steigendem Windenergieanteil auf. Die Kosten steigen jedoch mit steigendem Photovoltaikanteil wieder an, liegen dabei jedoch immer noch deutlich unter den Kosten der Variante ohne Biomasseanteil. Das Kostenminimum bei einem Versorgungsgrad

⁷Keine Sonneneinstrahlung, kein Wind und keine gespeicherte elektrische Energie im Batteriesystem.

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

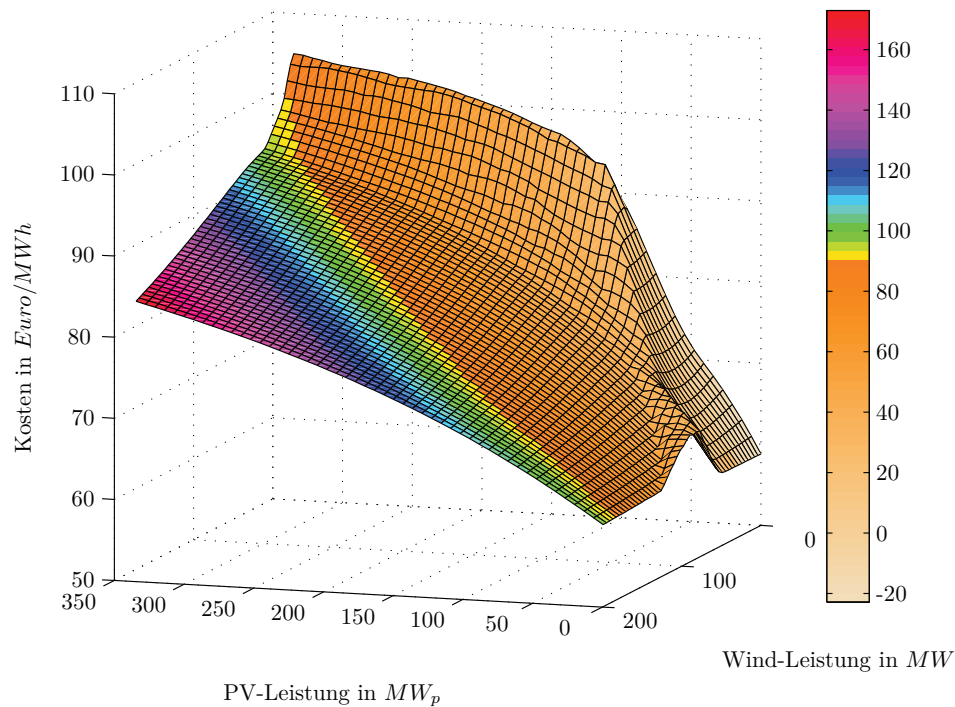


Abb. 3.9.: Gesamtstromgestehungskosten in Abhängigkeit der installierten Leistung und des Versorgungsgrades, mit 20 MW_{el} Biomasse. Die Farbskala gibt den Versorgungsgrad in Prozent an.

von 100 Prozent ist bei einem maximalen Windenergieausbau von 199 MW und einer vergleichsweise geringen Photovoltaikleistung von 15 MW_p zu finden.

3.2.4. Bedarfssteigerung

Der vorliegende Lastgang weist mit einer Maximalleistung von 46,1 MW eine deutlich niedrigere Leistung auf, als vertraglich bereitgestellt werden muss. Prinzipiell muss die Bestelleistung von 124 MW zu jeder Zeit abgerufen werden können. Durch die Erhöhung der installierten BHKW Leistung kann diese Anforderung an den Erzeugerpark sichergestellt werden, sofern die der Energieverbrauch konstant bleibt. Geht man in diesem Zuge davon aus, dass der Energiebedarf der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz gleichförmig auf eine Maximalleistung von 124 MW ansteigt, ergibt sich ein Energiebedarf von 866 GWh/a. Unter diesen Voraussetzungen muss die Zusammensetzung des Erzeugerarks neu bewertet werden. Um diese Energiemenge summarisch mit Energie aus Photovoltaikanlagen zu decken ist eine installierte Leistung von 912 MW_p , mit reiner Windenergie sind 541 MW erforderlich. Zur vollständigen Bedarfsdeckung mit Biomasse ist eine installierte Leistung von 99 MW_{el} notwendig, was lediglich bei der vollständigen Ausnutzung des technischen Potenzials der Planungsregion Mittelthüringen möglich wäre. Weiterhin ist die danach verfügbare Leistung aus Biomasse in einem nur sehr beschränkten Maße vorhanden.

Bleibt die installierte Biomasseleistung konstant bei 20 MW_{el} , ergeben sich die in Tab. 3.9 dargestellten notwendigen installierten Leistungen mit dem dazugehörigen Batteriespeicherbedarf und den resul-

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

Tab. 3.7.: Prognostizierte installierte Leistung erneuerbarer Energien in der Planungsregion Mittelthüringen nach [1].

	Photovoltaik in MW _p	Windenergie in MW	Biomasse in MW	Gesamt in MW
2010 (IST)	75	231	17	323
bis zum Jahr 2020				
Referenzszenario	269	556	35	860
Amb. Szenario	468	1.017	36	2.334
Exzellenzszenario	786	1.418	40	3.378
bis zum Jahr 2050				
Referenzszenario	427	880	87	1.394
Amb. Szenario	1.664	2.490	94	6.738
Exzellenzszenario	2.935	5.846	109	10.352

Tab. 3.8.: Gesamtstromgestehungskosten (Auszug) in Abhängigkeit der installierten Leistung und des Versorgungsgrades, mit 20 MW_{el} Biomasse bei einem Energiebedarf von 866 GWh.

Variante	PV Leistung in MW _p	Wind Leistung in MW	Speicherbedarf in MWh	Kosten in Euro/MWh
hoher PV Anteil	912	168	6.106	124,90
Medium (PV/Wind)	472	429	2.495	95,32
hoher Wind Anteil	314	541	2.824	87,31
Maximum (PV/Wind)	912	541	1.770	92,73

3. Ermittlung der erforderlichen Erzeuger- und Speicherkapazität

tierenden Gesamtstromgestehungskosten. Die verfügbare BHKW Leistung wurde dabei auf 124 MW erhöht.

Das Verhältnis von installierter Photovoltaik- und Windleistung verhält sich dabei analog zu Abschnitt 3.2.3, wo ein möglichst hoher Windanteil der vergleichsweise teuren Photovoltaik vorzuziehen ist. Diese Erzeugerkombination erfordert aufgrund der vergleichsweise geringen Biomasseleistung, welche zur Abdeckung der Spitzenlast verwendet wird, einen zusätzlichen Batteriespeicher. Die erzeugte Überschussenergie wird darin zwischengespeichert und steht bei nicht ausreichender Energieerzeugung zur Verfügung. Die erforderliche Speicherkapazität beträgt dabei mindestens 2820 MWh. Eine Erhöhung der installierten Windleistung führt dabei zu keiner Verringerung der erforderlichen Batteriespeicherkapazität, da diese zur Überbrückung von Zeiten mit wenig verfügbarer Windenergie benötigt wird. Eine Erhöhung der Photovoltaikleistung hingegen führt zu einer direkten Senkung der erforderlichen Batteriespeicherkapazität. In den Monaten mit geringerem Windaufkommen liegt im langjährigen Mittel das Einstrahlungsmaximum. Tagsüber kann dann genug Energie erzeugt werden, um den Bedarf ausreichend zu decken. Weiterhin kann genug Überschussenergie erzeugt werden um diese für die Nacht zwischen zu speichern.

Ausgehend von einer weiteren gleichförmigen Bedarfssteigerung auf eine maximale Abnahmeleistung von 146 MW, entsteht ein Energiebedarf von 1.020 GWh. Zur Deckung dieses Energiebedarfs wäre eine reine Photovoltaikleistung von 1.074 MW_p bzw. eine reine Windleistung von 638 MW erforderlich. Zur reinen Bedarfsdeckung mit Biomasse wäre eine kontinuierliche Leistung von 116 MW erforderlich. Der Biomasseanteil am Erzeugerpark wurde aufgrund der unveränderten Potenzialsituation nicht verändert. Das Kostenminimum entsteht auch hier bei einem möglichst hohen Windenergieanteil am

Tab. 3.9.: Gesamtstromgestehungskosten (Auszug) in Abhängigkeit der installierten Leistung und des Versorgungsgrades, mit 20 MW_{el} Biomasse bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh.

Variante	PV Leistung in MW _p	Wind Leistung in MW	Speicherbedarf in MWh	Kosten in Euro/MWh
hoher PV Anteil	1.074	198	7.668	129,70
Medium (PV/Wind)	556	506	3.287	99,68
hoher Wind Anteil	370	638	3.540	91,24
Maximum (PV/Wind)	1.074	638	2.622	95,92

Enerzeugermix. Demnach wäre bei dieser Bedarfssituation eine Photovoltaikleistung von 370 MW_p, eine Windleistung von 638 MW, eine nutzbare Speicherkapazität von 3.540 MWh und eine Biogasleistung von 20 MW_{el} erforderlich um eine Vollversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz mit 100 Prozent erneuerbaren Energien zu realisieren.

4. Bewertung

Die Energieversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz kann unter bestimmten Rahmenbedingungen zu 100 Prozent mit erneuerbaren Energien sichergestellt werden. Die kostengünstigste Variante zur Energieversorgung stellt dabei ein möglichst hoher Anteil von Windenergie im Erzeugerpark dar. Diese Energieform weist derzeit die geringsten Stromgestehungskosten erneuerbarer Energieträger auf und bietet zudem ein enormes Ausbaupotenzial. Aufgrund der zeitlichen Diskontinuität der Energiebereitstellung aus Windkraftanlagen, muss diese Form der Energieerzeugung durch eine weitere Technologie ergänzt werden. Das saisonale Erzeugungstief der Windenergie wird dabei durch das Erzeugungshoch der Photovoltaik gut ergänzt. Dennoch können auch bei der Kombination beider Energieträger in einem Erzeugerpark immer wieder Phasen von nicht ausreichender Energieproduktion auftreten. Ist ein ausreichendes Biomassepotenzial zur Erzeugung von Biogas vorhanden kann dieses zur Ergänzung genutzt werden. Die Methanisierung von Biomasse erfolgt in einem kontinuierlichen Prozess, so dass hier eine zum Gesamtleistungsbedarf deutlich geringere Fermenterleistung erforderlich ist um den Anforderungen hinsichtlich einer Fehllastdeckung zu genügen. Voraussetzung dabei ist, dass das erzeugte Biogas gespeichert werden kann. Zur Speicherung bietet sich dabei das bestehende Erdgasnetz an. Diese Speichermethode hätte den Vorteil, dass die Biogaserzeugung geographisch unabhängig erfolgen kann. Die erforderliche Biomasse kann dann in räumlich verteilten, kleineren Erzeugungseinheiten methanisiert werden; die dazu erforderliche Biomasse muss nicht über weite Strecken transportiert werden. Die Bereitstellung der erforderlichen elektrischen Energie erfolgt dann in einer großen Zahl dezentraler BHKW mit einer vergleichsweise geringen Leistung. Dadurch wird die Aufstellung in der Nähe von Wärmebedarfen ermöglicht und eröffnet die Abwärmenutzung, was zu einer Steigerung des Wirkungsgrades führt.

Die Energieversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz durch lokal, d.h. in unmittelbarer Nähe, vorhandener Potenziale von Photovoltaik, Windenergie und Biomasse ist nicht realisierbar. Selbst auf Landkreisebene ist das Ziel einer sicheren und nachhaltigen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien nicht erfolgversprechend. Eine ausschließlich erneuerbare Energieversorgung ist folglich nur unter Einbeziehung überregionaler Potenziale möglich, was mit der überregionalen Ausstrahlung des Industriegebiets Erfurter Kreuz hinsichtlich Wirtschaftsleistung und Beschäftigung korrespondiert. Neben der Verfügbarkeit der Potenziale, muss dann auch der überregionale Energiebedarf insbesondere von Gewerbe, Handel und den privaten Haushalten mit berücksichtigt werden. Langfristig stellt dabei das vorhandene Biomassepotenzial den limitierenden Faktor dar. Das hier angenommene für die Energieversorgung benötigte Potenzial von 20 MW_{el} entspricht 50 bis 60 Prozent der im Jahr 2020 prognostizierten Leistung in der gesamten Planungsregion Mittelthüringen. Nutzungskonflikte können

hier zum einen im Bereich der Nutzung der elektrischen Energie auftreten. Zum Anderen kann durch den gezielten Einsatz der Biomasse zur Abdeckung von Fehlleistung im Versorgungsnetz ein Anreiz zum vermehrten Anbau von Energiepflanzen geschaffen werden. Das ist insbesondere dann bedenklich, wenn dieser Anbau auf Flächen auf denen vormals Nahrungsmittel angebaut wurden erfolgt, die Fruchtfolge nicht mehr eingehalten wird oder eine Überdüngung zur Ertragssteigerung einsetzt. Auch bei nicht ausreichendem Biomassepotenzial ist eine hundertprozentige erneuerbare Energieversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz theoretisch möglich. Dazu muss dann vermehrt auf Windkraft- und Photovoltaikpotenziale der Planungsregion Mittelthüringen zurückgegriffen werden. Weiterhin muss eine entsprechende Speicherkapazität vorgesehen werden, die sich negativ auf die Gesamtstromgestehungskosten auswirkt. In dieser Studie wurde zur Abschätzung des Speicherbedarfs dazu ein Batteriesystem angenommen. Batteriesysteme stellen zwar eine vergleichsweise kostenintensive Form der Speicherung dar, haben jedoch den Vorteil, dass sie dezentral errichtet und betrieben werden können. Andere Speicherverfahren wie Pumpspeicherkraftwerke oder Power-to-Gas-Speicher sind großtechnische Anlagen, die als Bestandteile des gesamten Energieversorgungssystems Systemdienstleistungen erbringen und insofern losgelöst von der konkreten Versorgungsaufgabe eines Industriegebiets zu betrachten wären.

Abschließend lässt sich sagen, dass die vorliegenden Untersuchungen die Vorzüge eines möglichst großräumigen Netzverbundes belegen. Industriegebiete der Größe des Erfurter Kreuzes weisen ein energetisches Einzugsgebiet auf, so dass die Versorgungsaufgabe immer eine regionale Aufgabe darstellt und daher im Zusammenhang mit anderen regionalen Verbrauchern betrachtet werden sollte. Starke lokale Schwankungen von Einstrahlung oder Windgeschwindigkeit fallen dadurch weniger ins Gewicht. Weiterhin steht das spezifische Lastprofil eines Industriegebiets einem hohen Photovoltaikanteil innerhalb des Erzeugerparks entgegen; hier sind bei gemischten oder überwiegend für Wohnzwecke genutzten Versorgungsgebieten deutlich andere Ergebnisse zu erwarten. Bei ausgebauter Netzinfrastruktur ist daher die Konzentration industrieller Verbraucher in Industriegebieten auch bei einem hohen Anteil erneuerbarer Energien energietechnisch unproblematisch.

A. Meteorologische Rahmenbedingungen

A.1. Einstrahlung

Die potenziell mit einer Photovoltaikanlage zu erzeugende elektrische Energie ist direkt proportional zur Einstrahlung auf die Modulebene. In Tab. A.1 sind dazu die monatlich gemittelten Globalstrahlungswerte auf die horizontale Ebene und eine Ebene mit einer Ausrichtung nach Süden (Azimut=0°) und einem Neigungswinkel von 30° aufgeführt. Die Daten entstammen der Wetterdatenbank Meteonorm. Mittels des Datenbankprogramms Meteonorm können gemittelte Wetterdatensätze in stündlicher Auflösung für jeden beliebigen Standort erzeugt werden. Die Datengrundlage bildet ein in Europa sehr umfangreiches Netz von Bodenmessstationen, die neben der Globalstrahlung auch Daten zur Temperatur, Windstärke bzw. -richtung und anderen wetterrelevanten Parametern erfassen. Die Strahlungsdaten der Stationen in Deutschland liegen für den Messzeitraum von 1981 bis 2000 vor. Bei

Tab. A.1.: Globalstrahlungswerte Standort Erfurt-Bindersleben Zeitraum 1981 - 2000 (Quelle: Meteonorm)

	Globalstrahlung (horizontal) kWh/m ²	Globalstrahlung (Azimut=0°, Neigung=30°) kWh/m ²	Umgebungstemperatur °C
Januar	21,6	37,0	-1,16
Februar	40,4	58,3	-0,75
März	72,3	90,0	2,92
April	108,2	119,8	7,05
Mai	144,0	145,0	11,90
Juni	147,4	144,4	15,12
Juli	153,6	153,3	17,05
August	135,5	145,2	16,71
September	85,8	102,8	13,14
Oktober	54,7	74,9	8,90
November	23,1	36,3	3,54
Dezember	16,3	26,4	0,59
Jahr	1002,8	1133,5	7,97

den in Tab. A.1 aufgeführten Daten handelt sich um sogenannte langjährige Mittelwerte. Konkrete Einstrahlungswerte eines Jahres können dabei um 15 Prozent im Bezug auf die Strahlungsstärke abwe-

ichen [9]. Insbesondere die Zeitpunkte an denen ein bestimmter Strahlungswert vorliegt können dabei deutlich von den in dieser Studie genannten Zeitpunkten abweichen. Die langjährigen Mittelwerte bieten die Möglichkeit die notwendige zu installierende Leistung abzuschätzen.

A.2. Mittlere Windgeschwindigkeit

Windgeschwindigkeit und Windrichtung sind in hohem Maße von lokalen Gegebenheiten (Geländeform, Witterung etc.) abhängig. Daher können Messdaten von einem wenige Kilometer entfernten Standort stark vom denen am Betrachtungsort abweichen. Die in Tab. A.2 aufgeführten Daten zur Windgeschwindigkeit am Standort Erfurt-Bindersleben stellen demnach nur eine grobe Näherung dar. Sie entstammen analog zu den Strahlungswerten dem Datenbankprogramm Meteonorm. Die Erzeugung dieser Daten basiert auf Messwerten von 30 Windmessstationen in den USA und 20 Windmessstationen in der Schweiz. Mit Hilfe eines mathematischen Modells werden entsprechende Messwerte für den selben Geländetyp und die identische Klimazone umgerechnet. Die Generation der Winddaten basiert dabei auf der Annahme, dass an beiden Standorten die Windgeschwindigkeiten einer Weibull-Funktion folgen. Dabei wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die in dieser Studie verwendeten Winddaten nur eine grobe Näherung möglicher Windverhältnisse am Standort entsprechen. Die exakten Bedingungen können nur durch eine Langzeitmessung vor Ort bestimmt werden. Für die etwaige Auslegung von Windkraftanlagen können diese Daten nicht verwendet werden.

Tab. A.2.: Windgeschwindigkeit in einer Höhe von 10m am Standort Erfurt-Bindersleben Zeitraum 1981 - 2000 (Quelle: Metetonorm)

	Windgeschwindigkeit m/s	Umgebungstemperatur °C
Januar	3,5	-1,16
Februar	3,0	-0,75
März	3,4	2,92
April	3,1	7,05
Mai	2,8	11,90
Juni	2,8	15,12
Juli	2,6	17,05
August	2,3	16,71
September	2,5	13,14
Oktober	2,9	8,90
November	3,5	3,54
Dezember	3,6	0,59
Jahr	3,0	7,97

Die in Tab. A.2 aufgeführten Monatsmittelwerte der Windgeschwindigkeit entsprechen einer Höhe

von 10m über dem Boden. Für die Abschätzung der abgegebenen Leistung einer Windenergieanlage werden die generierten Windgeschwindigkeiten ($v_{Wind,10m}$) auf die Windgeschwindigkeit (v_{Nabe}) in einer Nabenhöhe (h_{Nabe}) von 100m umgerechnet.

$$v_{Nabe} = v_{Wind,10m} \cdot \frac{\log\left(\frac{h_{Nabe}}{z_0}\right)}{\log\left(\frac{h_{Wind,10m}}{z_0}\right)} \quad (A.1)$$

Die Rauigkeitslänge wird dabei mit $0,1^1$ angenommen. Die mittlere Windgeschwindigkeit in 10m Höhe beträgt 3 m/s, auf 100m Nabenhöhe ergibt sich gem. Gl. A.1 eine mittlere Windgeschwindigkeit von 4,5 m/s.

A.3. Biomasse

Biomasse umfasst nach der Biomasseverordnung (2011) Energieträger aus der Phyto- und Zoomasse, deren Folge- und Nebenprodukte [1]. Die daraus gewinnbaren festen, flüssigen oder gasförmigen Energieträger stehen in einer vergleichsweise einfach zu speichernden Form einer weiteren energetischen Nutzung zur Verfügung. Im Bereich der Stromproduktion ist die Vergärung von fester und flüssiger Biomasse zu Biomethan und die anschließende Verstromung mittels eines BHKW die am gängigste Methode. Typischerweise erfolgt hier eine Nutzung der Abwärme (KWK), was den Systemwirkungsgrad des BHKW signifikant steigert. Der Standort der BHKW sollte daher jeweils an einem Standort mit einem entsprechenden Wärmebedarf erfolgen. Der Wärmebedarf der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz ist nicht bekannt. Ferner beschränkt sich diese Studie auf die elektrische Energieversorgung der Industriegroßfläche Erfurter Kreuz.

Die Vergärung der Biomasse zu Biomethan erfolgt in einem Fermenter, in einem kontinuierlichen Prozess. Es wird von einem stabilen Prozess und einer konstanten Gasausbeute über das ganze Jahr ausgegangen. Diese Technologie wird dabei zur Deckung der „Spitzenlast“ eingesetzt. Abweichend von der bisher üblichen Definition der Spitzenlast² handelt sich im Fall dieser Untersuchung um eine Deckung des Energiebedarfs zu Zeiten, an denen weder genügend Sonneneinstrahlung noch genügend Windenergie zur Verfügung steht. Es handelt sich daher eher um eine Fehllastleistung.

Der Ort der Gaserzeugung spielt dabei eine untergeordnete Rolle. Dieser sollte möglichst nah im Bereich der Biomasseerzeugung situiert sein, um lange Transportwege zu vermeiden. Das erzeugte Biomethan kann dann über ein Gasnetz zum Ort der Erzeugung transportiert werden. Die benötigten BHKW zur Verstromung können dann im räumlichen Bezug zu einem Wärmebedarf errichtet werden. Der Betrieb der BHKW erfolgt stromgeführt, d.h. dass eine Wärmeerzeugung nur erfolgt, wenn ein entsprechender Strombedarf vorhanden ist. Der Wärmebedarf ist dabei anzupassen oder eine geeignete Wärmespeicherung vorzusehen.

¹Kulturlandschaft mit geschlossenem Erscheinungsbild

²Spitzenlast: kurzzeitig auftretende hohe Leistungsnachfrage im Stromnetz.

B. Berechnungsergebnisse

B.1. Bedarfsdeckung mit einem Mix aus Photovoltaik, Windenergie und Biogas

B.1.1. Variante hoher PV Anteil

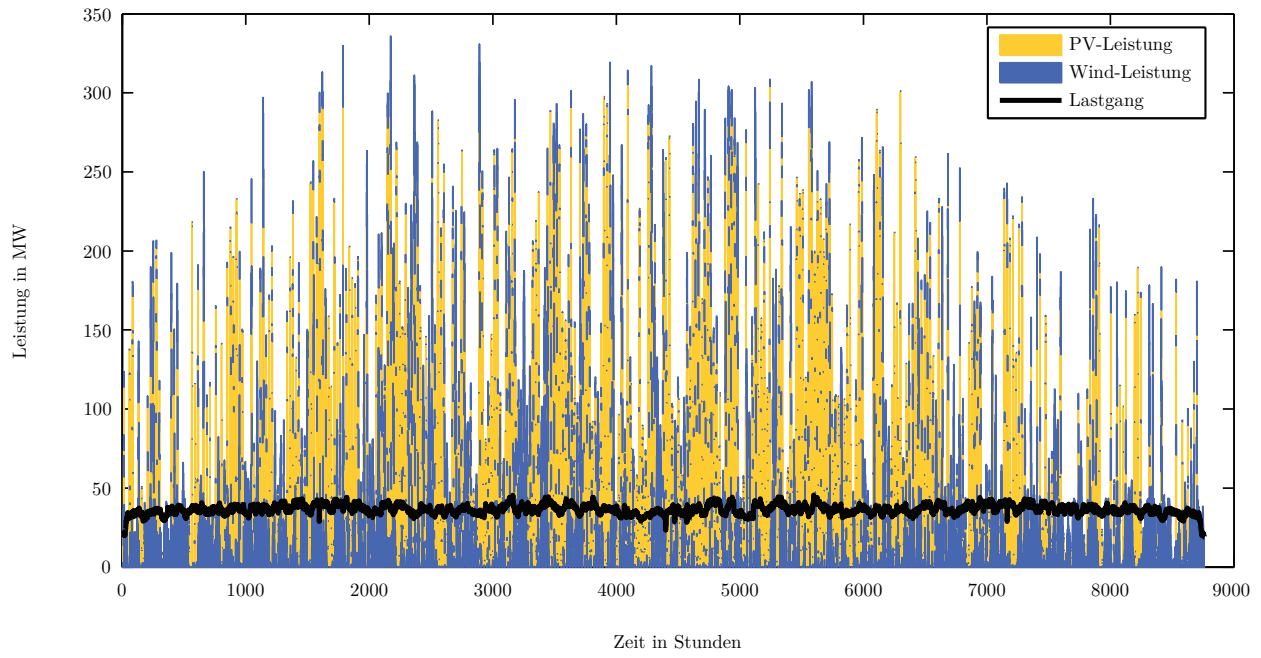


Abb. B.1.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 335 MW_p Photovoltaik und 61 MW Windkraft.

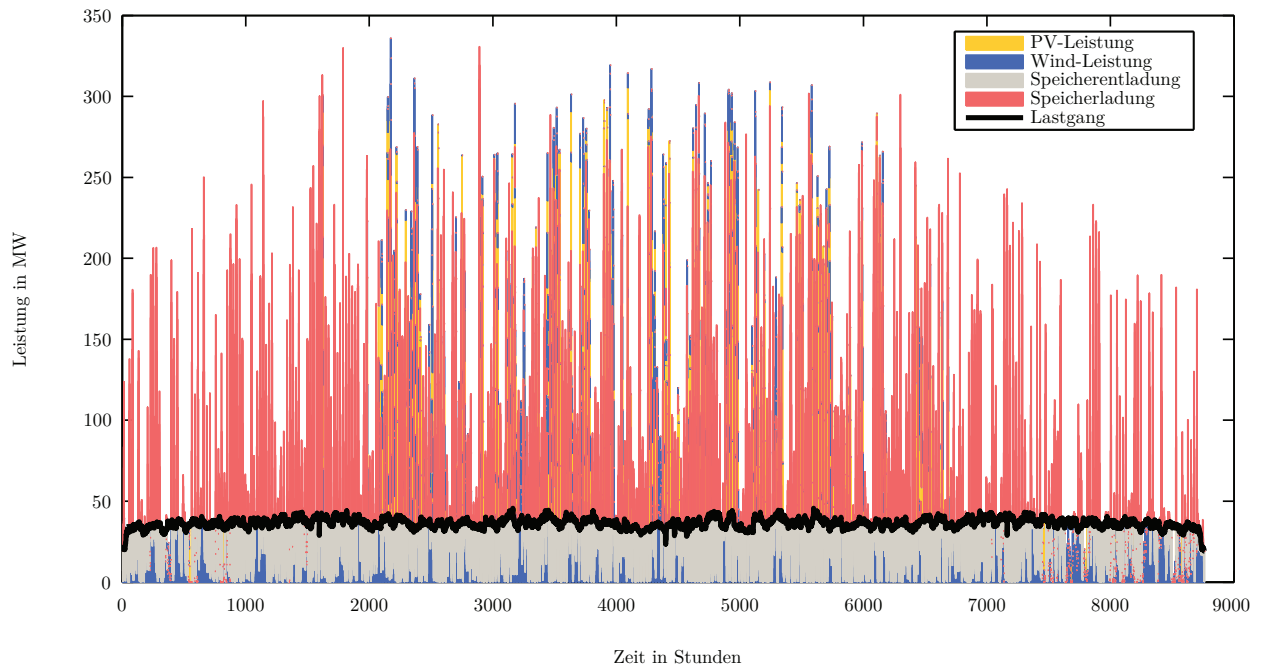


Abb. B.2.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 335 MW_p Photovoltaik und 61 MW Windkraft. Speicherkapazität=3112 MWh.

B.1.2. Variante Medium

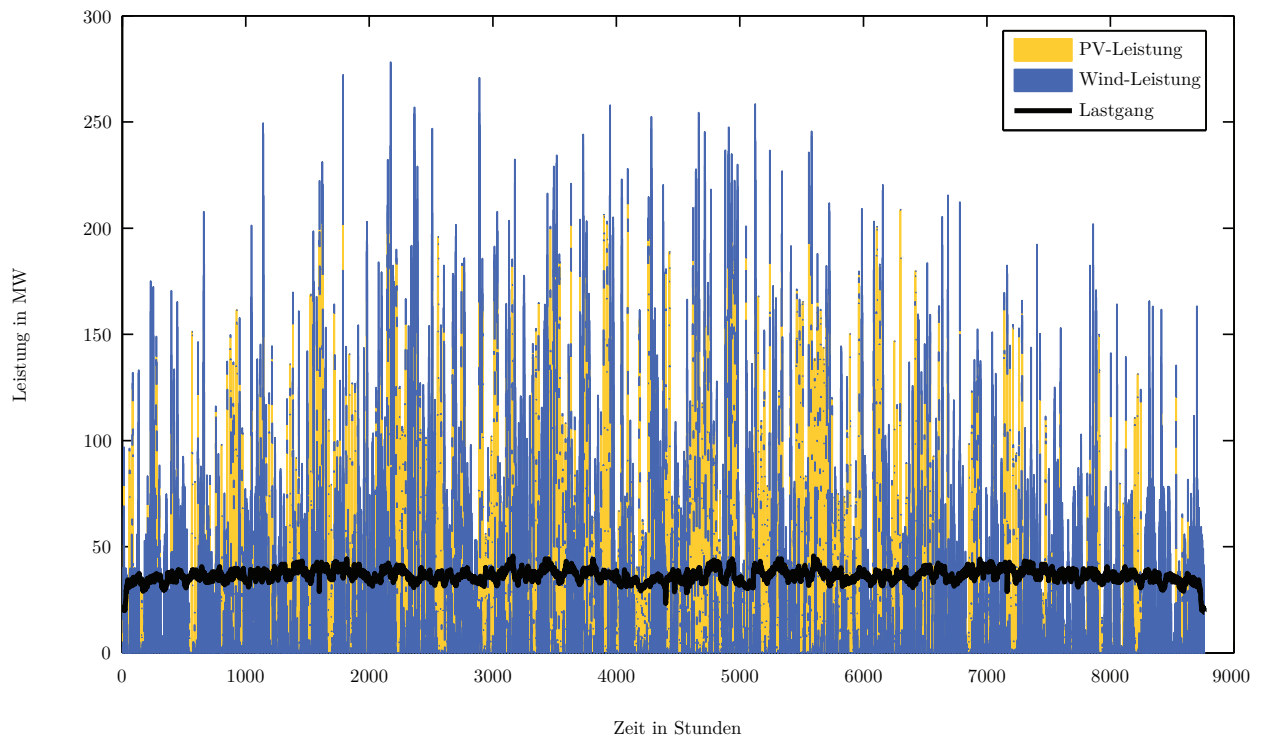


Abb. B.3.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 246 MW_p Photovoltaik und 110 MW Windkraft.

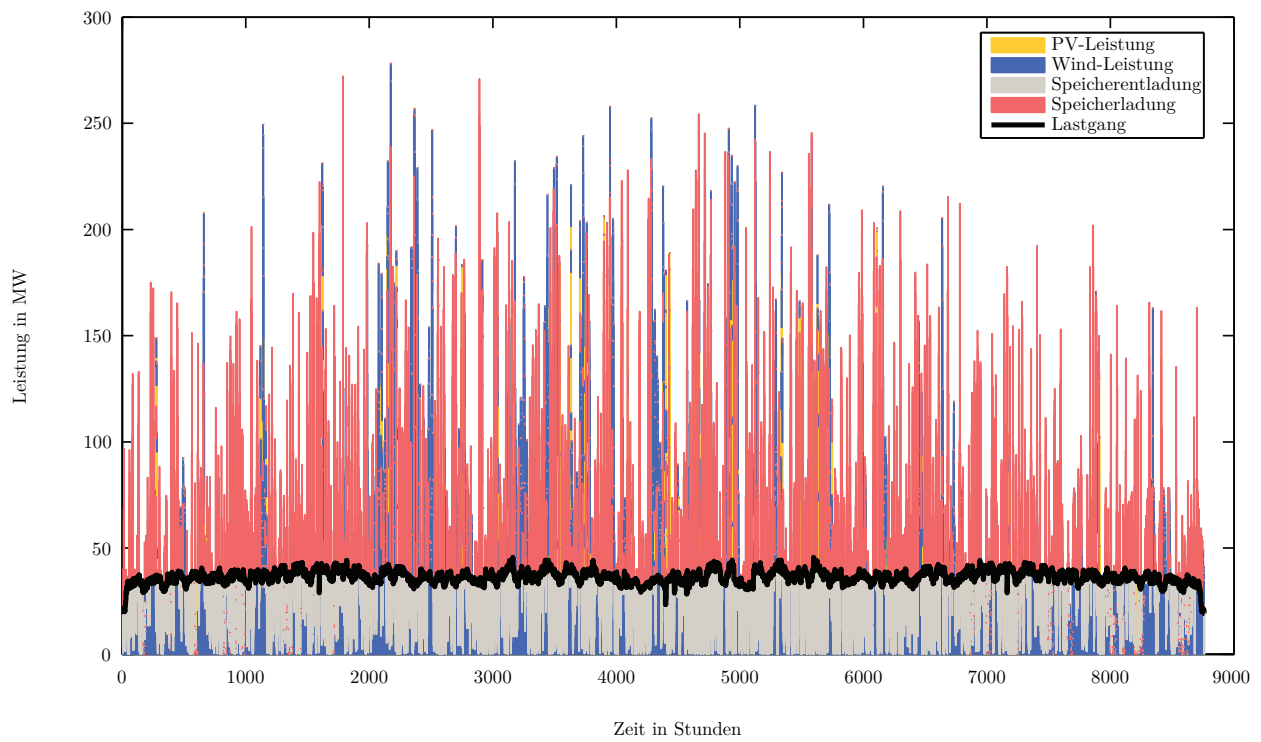


Abb. B.4.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 246 MW_p Photovoltaik und 110 MW Windkraft. Speicherkapazität=1.630,9 MWh

B.1.3. Variante hoher Windanteil

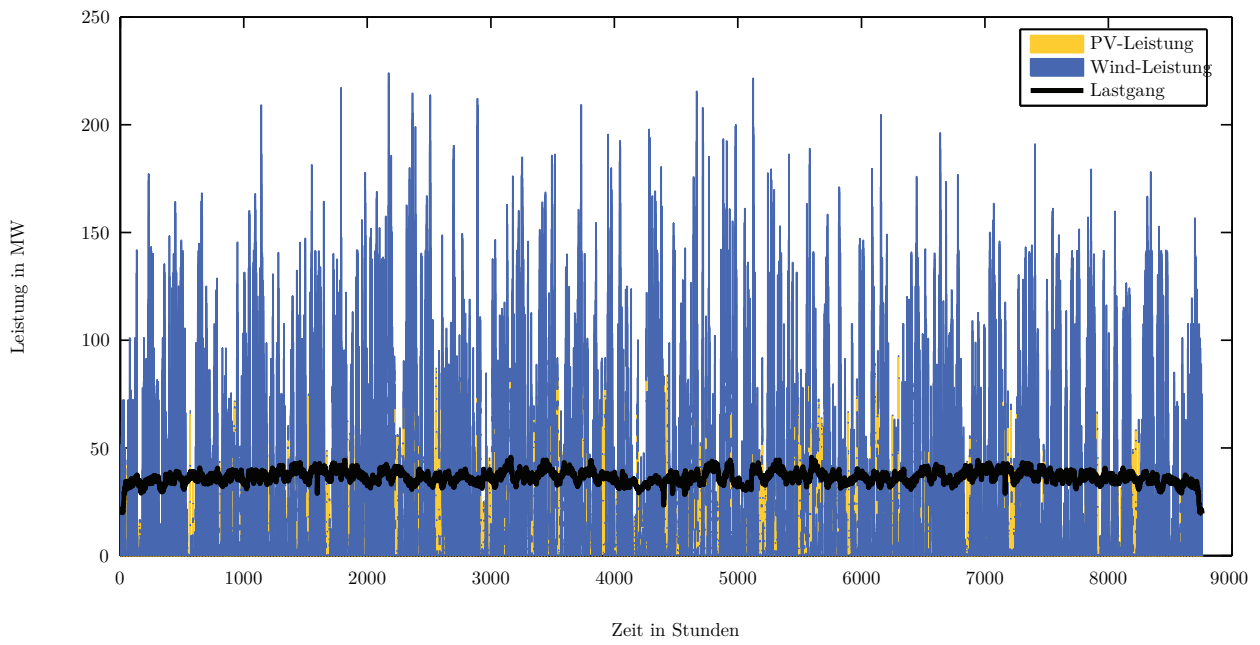


Abb. B.5.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 109 MW_p Photovoltaik und 199 MW Windkraft.

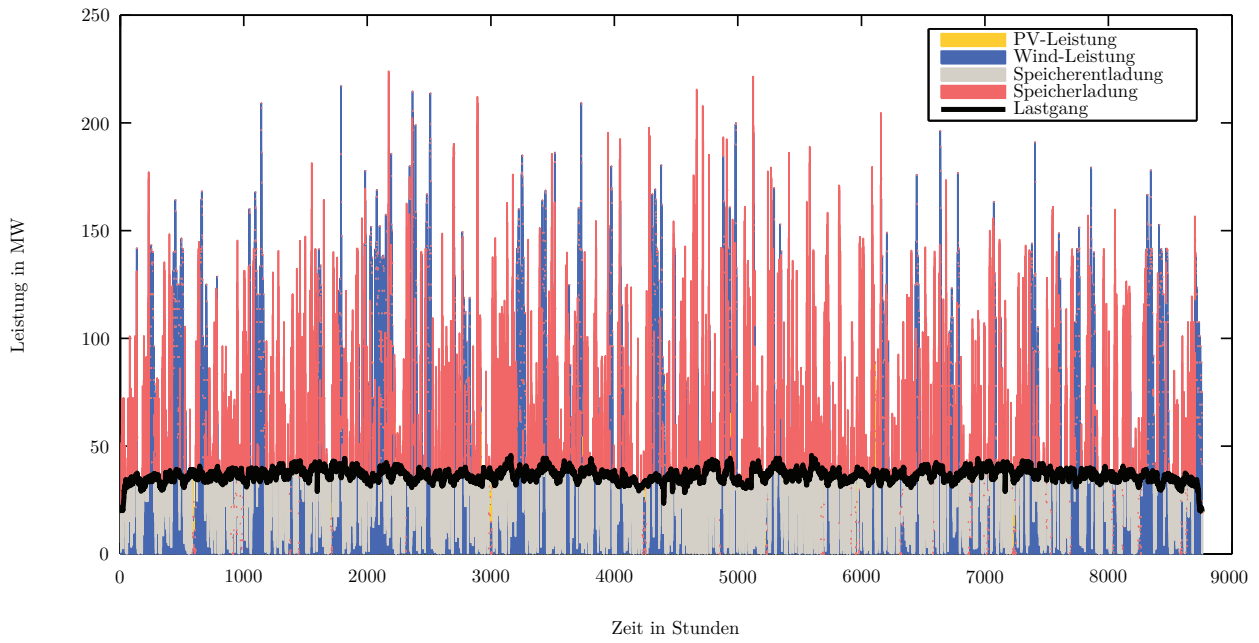


Abb. B.6.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicharentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 109 MW_p Photovoltaik und 199 MW Windkraft. Speicherkapazität=1.763,8 MWh.

B.1.4. Variante Maximum

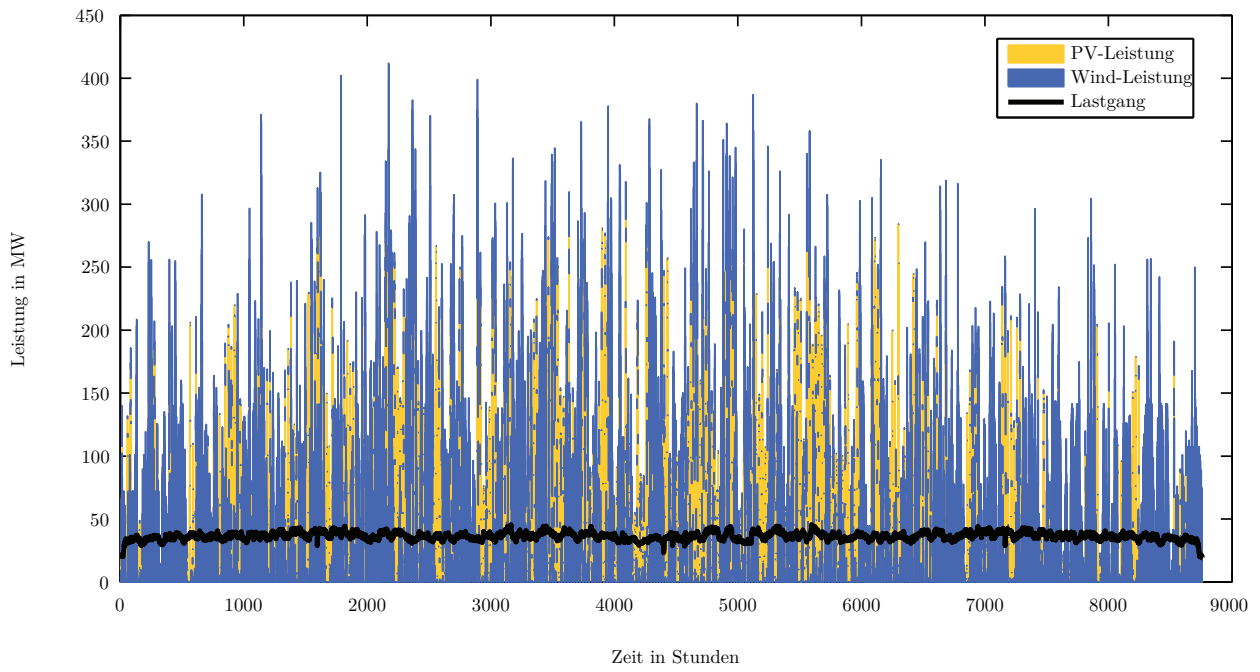


Abb. B.7.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 335 MW_p Photovoltaik und 199 MW Windkraft.

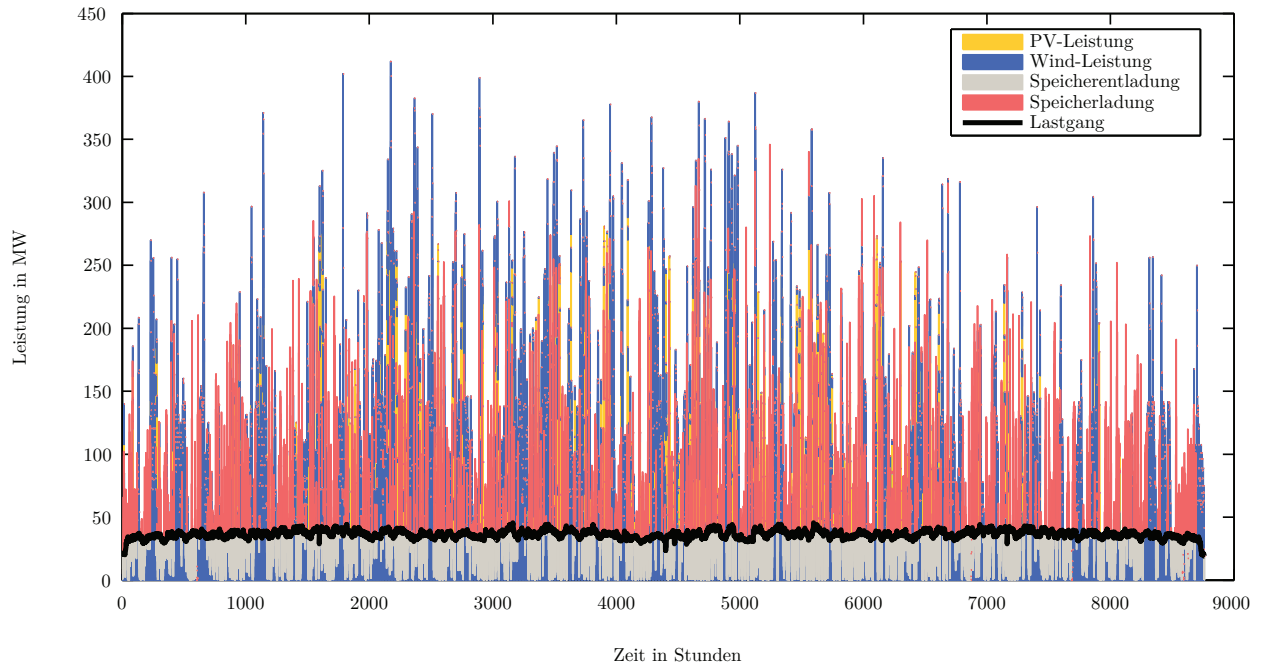


Abb. B.8.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 335 MW_p Photovoltaik und 199 MW Windkraft. Speicherkapazität=1.507,7 MWh

B.2. Bedarfsdeckung mit einem Mix aus Photovoltaik, Windenergie und 20 MW_{el} Biogas

B.2.1. Variante hoher PV Anteil

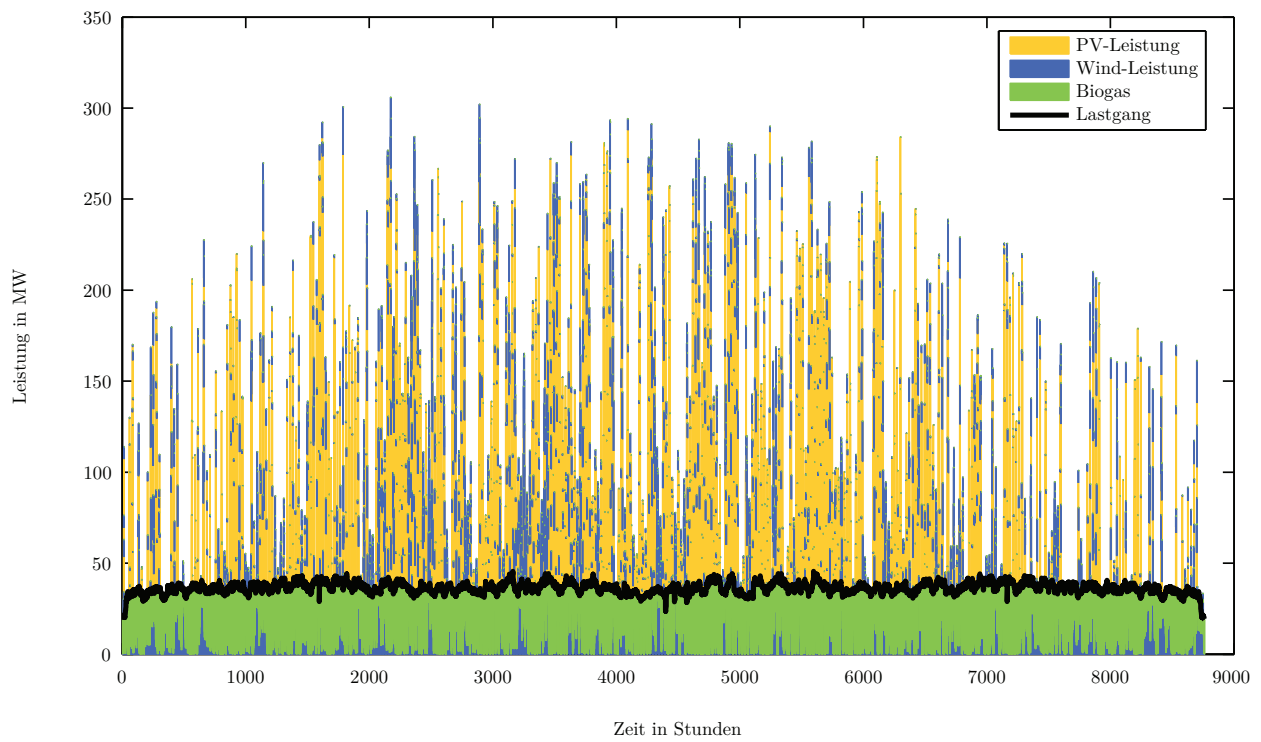


Abb. B.9.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 335 MW_p Photovoltaik, 41 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 46 MW_{el}).

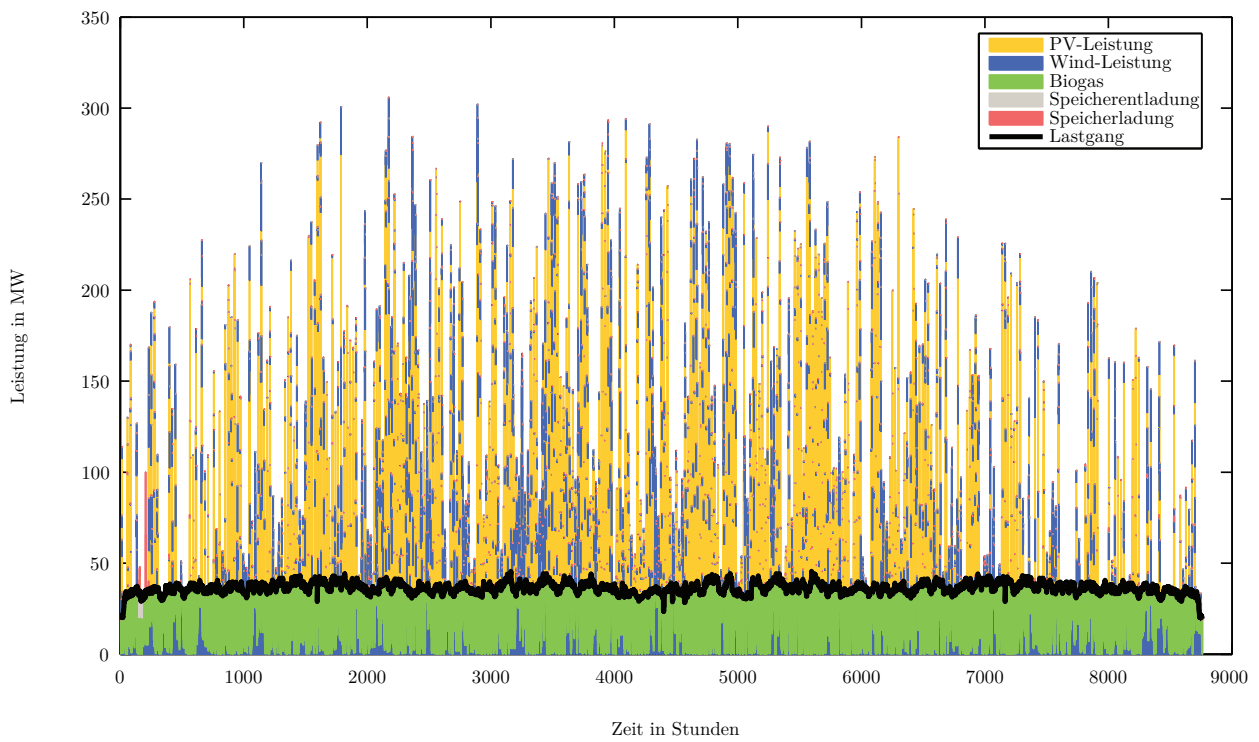


Abb. B.10.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 335 MW_p Photovoltaik, 41 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 46 MW_{el}). Die Speicherkapazität von 100 MWh wird nur am Jahresanfang benötigt, da bei den Anfangsbedingungen von einem relativ leeren Gasspeicher ausgegangen wurde. Am Jahresende ist genügend Überschussgas vorhanden, dass kein Batteriespeicher mehr notwendig ist.

B.2.2. Variante Medium

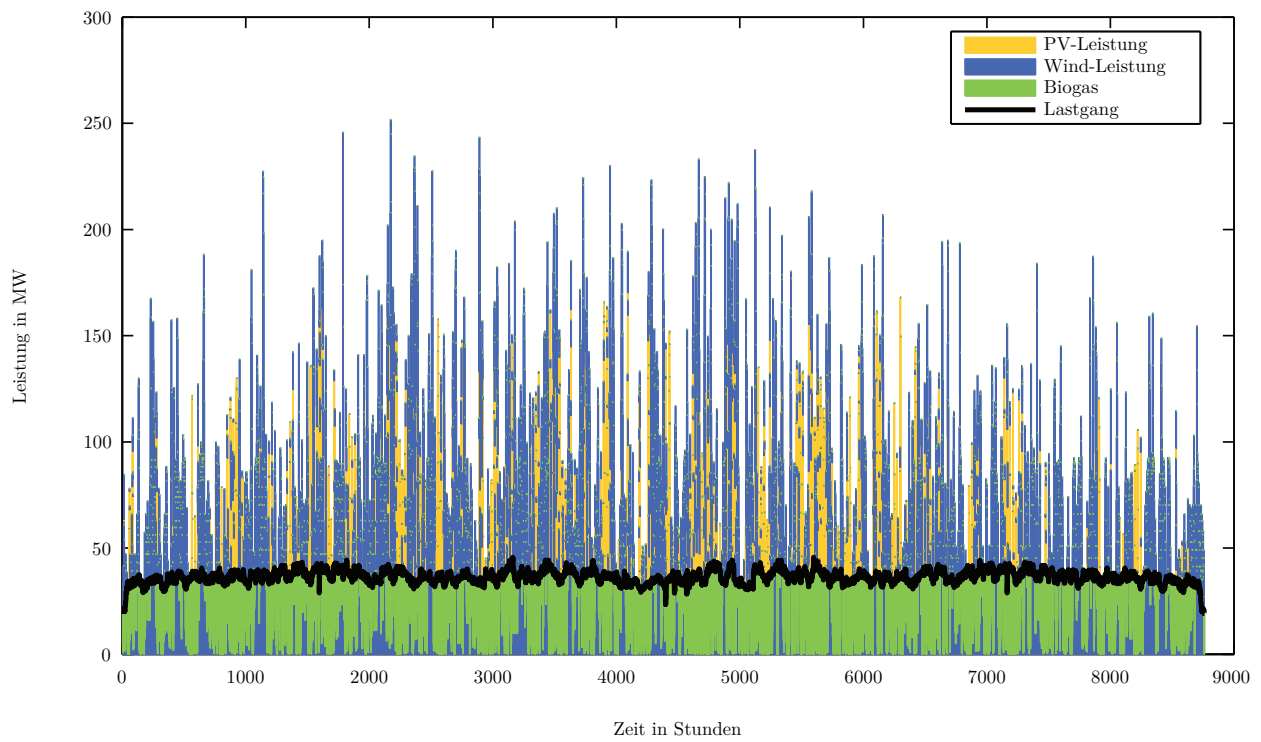


Abb. B.11.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 198 MW_p Photovoltaik, 130 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 46 MW_{el}).

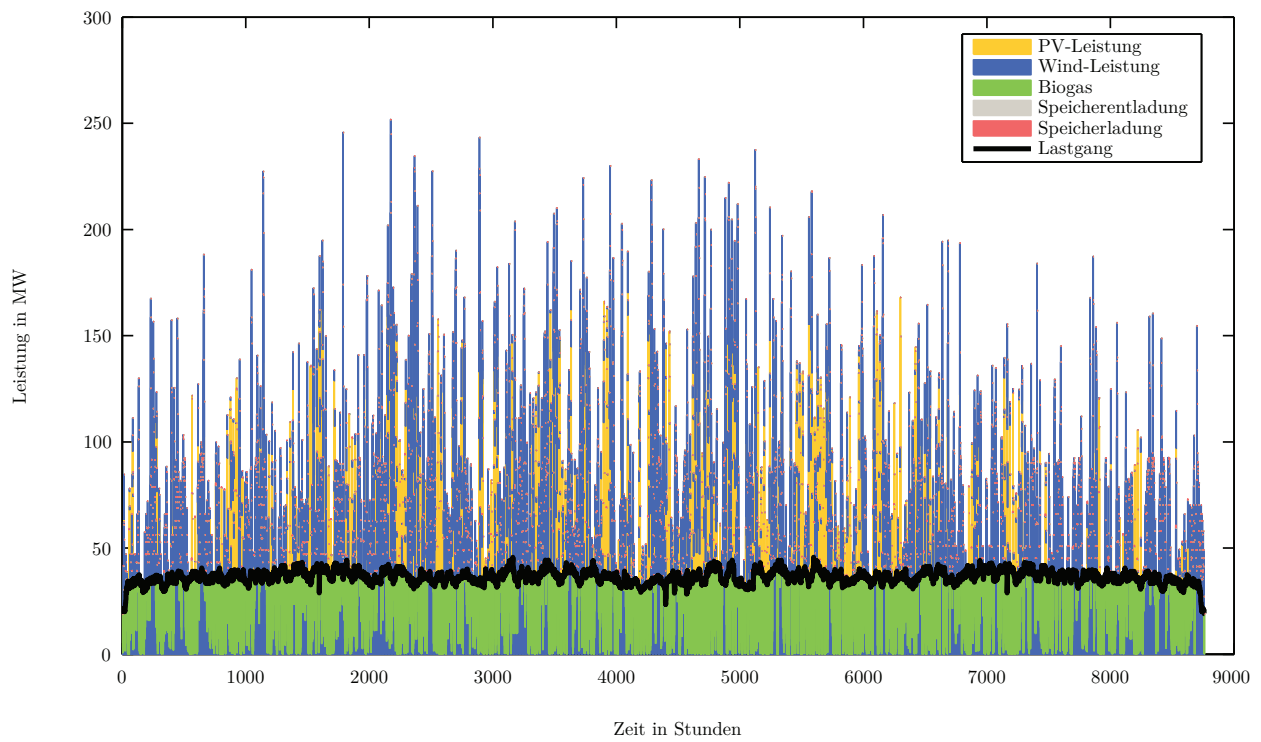


Abb. B.12.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 198 MW_p Photovoltaik, 130 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 46 MW_{el}). Speicherkapazität=0 MWh

B.2.3. Variante hoher Windanteil

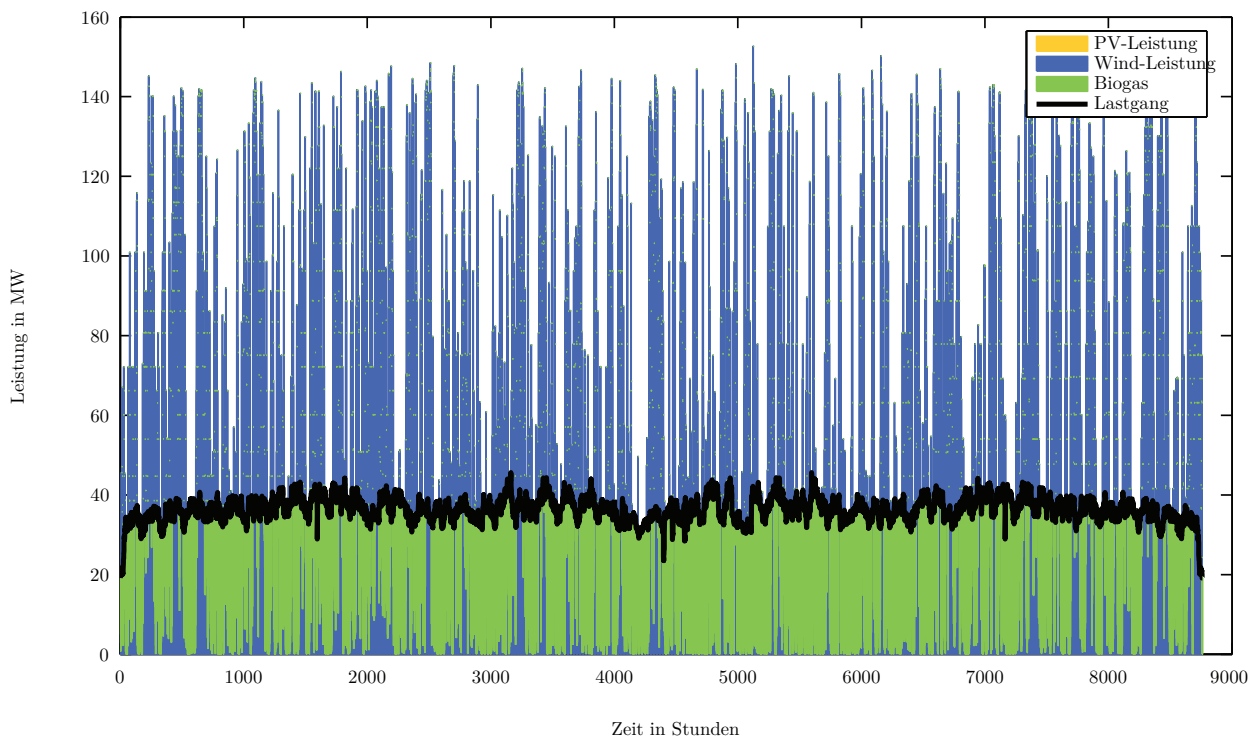


Abb. B.13.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 15 MW_p Photovoltaik, 199 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 46 MW_{el}).

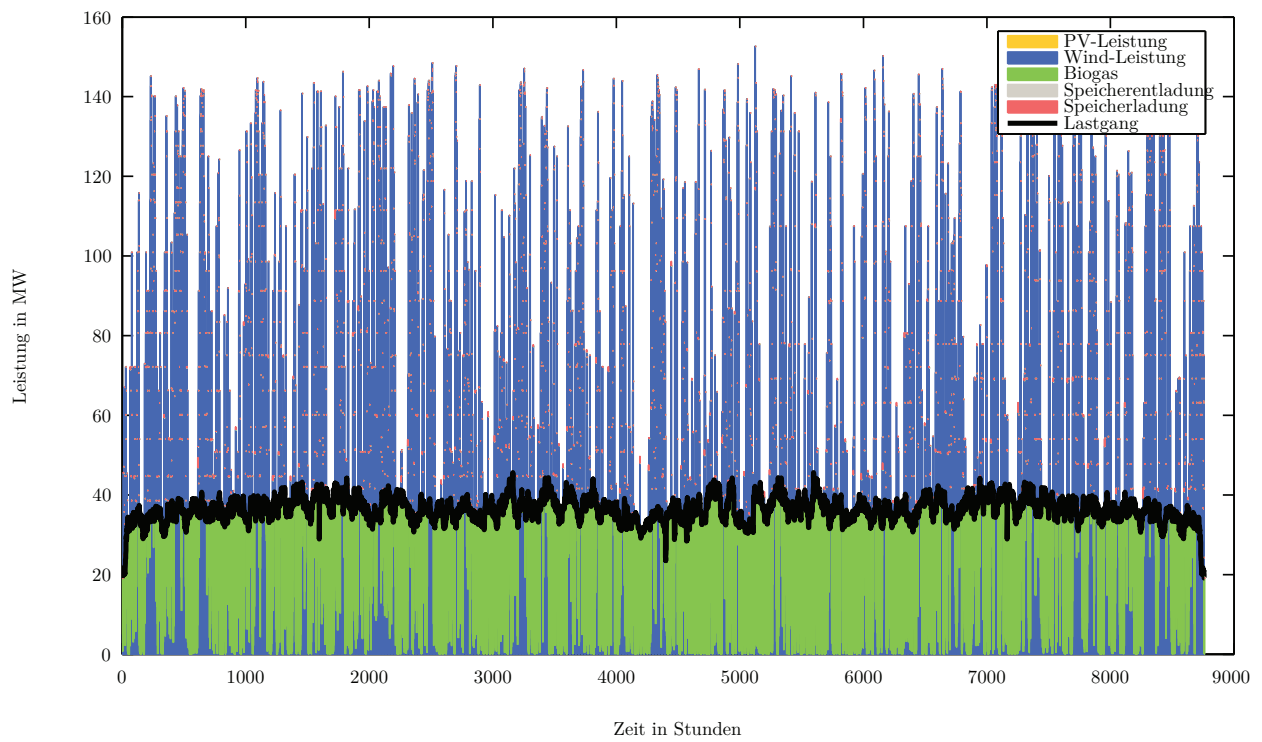


Abb. B.14.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 15 MW_p Photovoltaik, 199 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 46 MW_{el}). Speicherkapazität=0 MWh

B.2.4. Variante Maximum

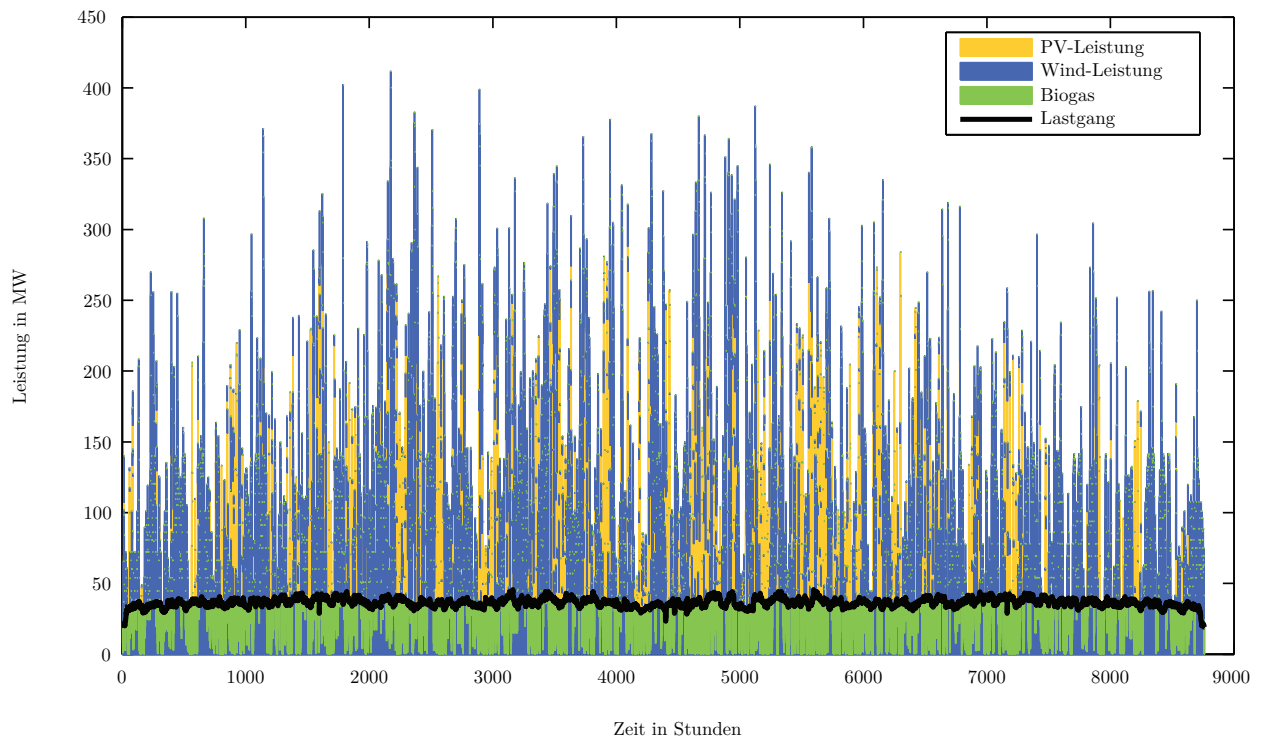


Abb. B.15.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 15 MW_p Photovoltaik, 199 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 46 MW_{el}).

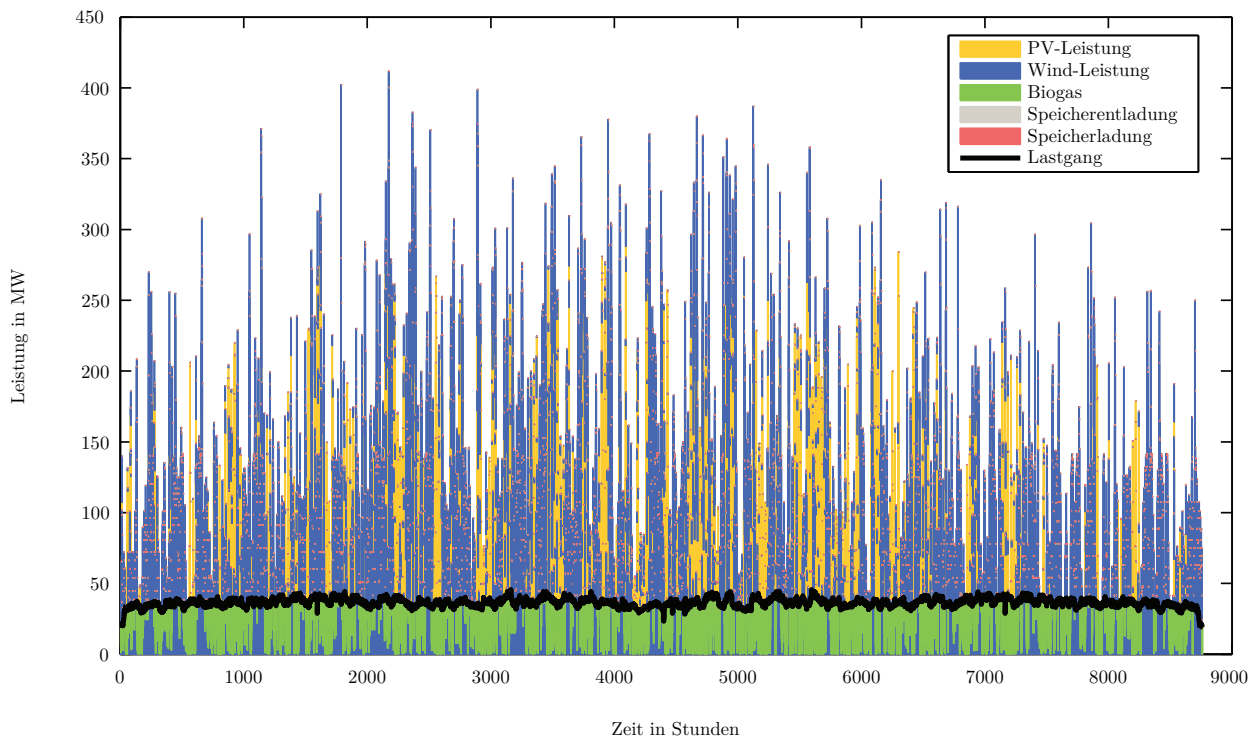


Abb. B.16.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 318 GWh und einer Erzeugerleistung von 335 MW_p Photovoltaik, 199 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 46 MW_{el}). Speicherkapazität=0 MWh

B.3. Bedarfssteigerung 124 MW

B.3.1. Variante hoher PV Anteil

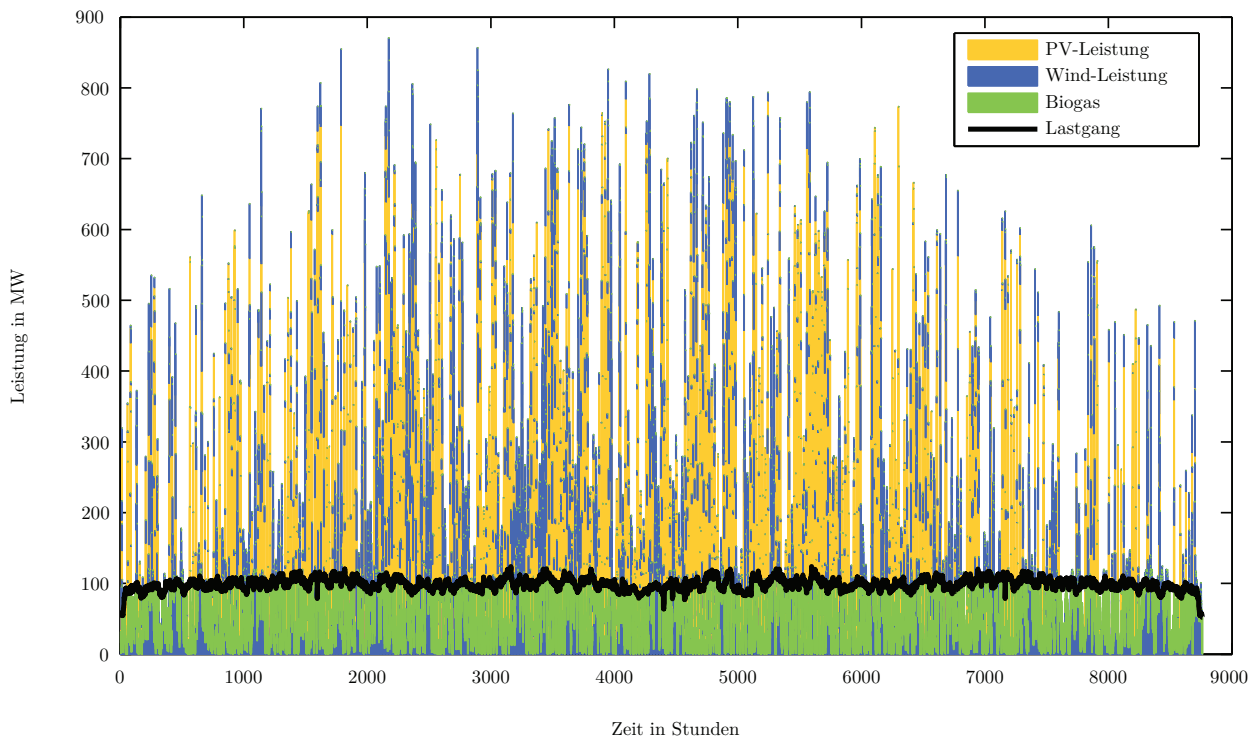


Abb. B.17.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 866 GWh und einer Erzeugerleistung von 912 MW_p Photovoltaik, 168 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 124 MW_{el}).

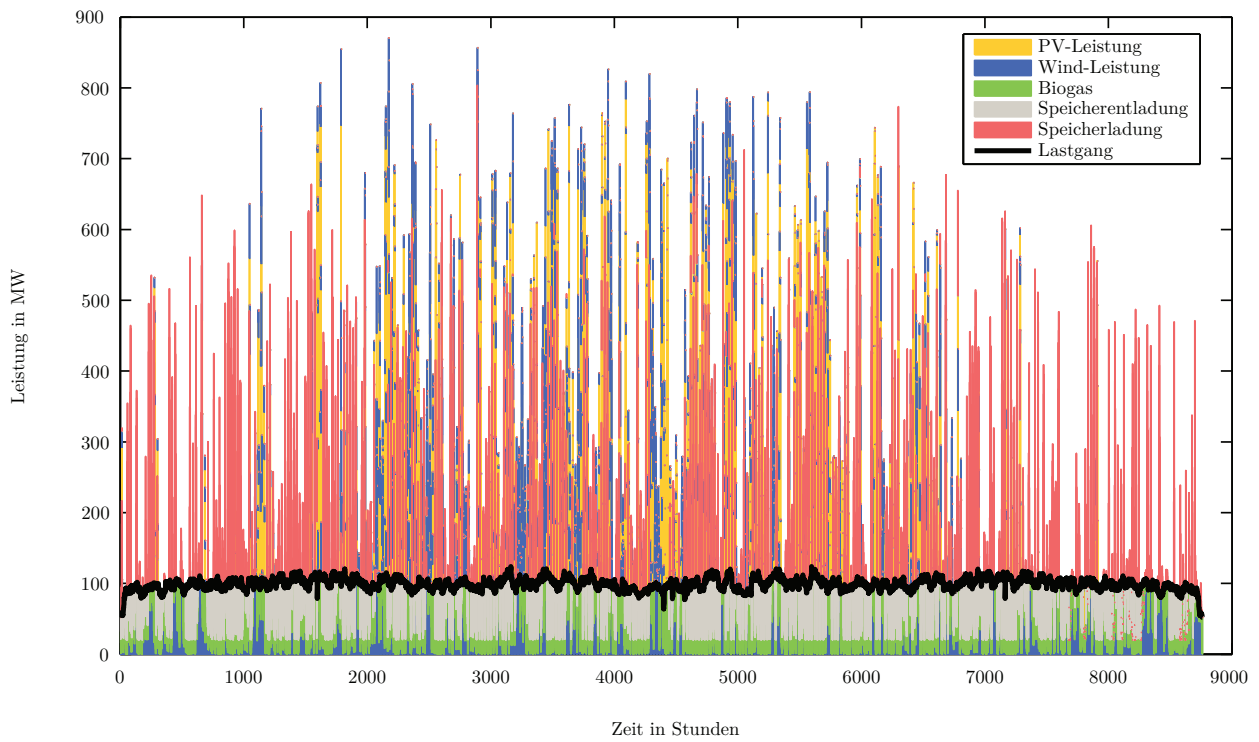


Abb. B.18.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 866 GWh und einer Erzeugerleistung von 912 MW_p Photovoltaik, 168 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung; 124 MW_{el}). Speicherkapazität=6.106 MWh.

B.3.2. Variante Medium

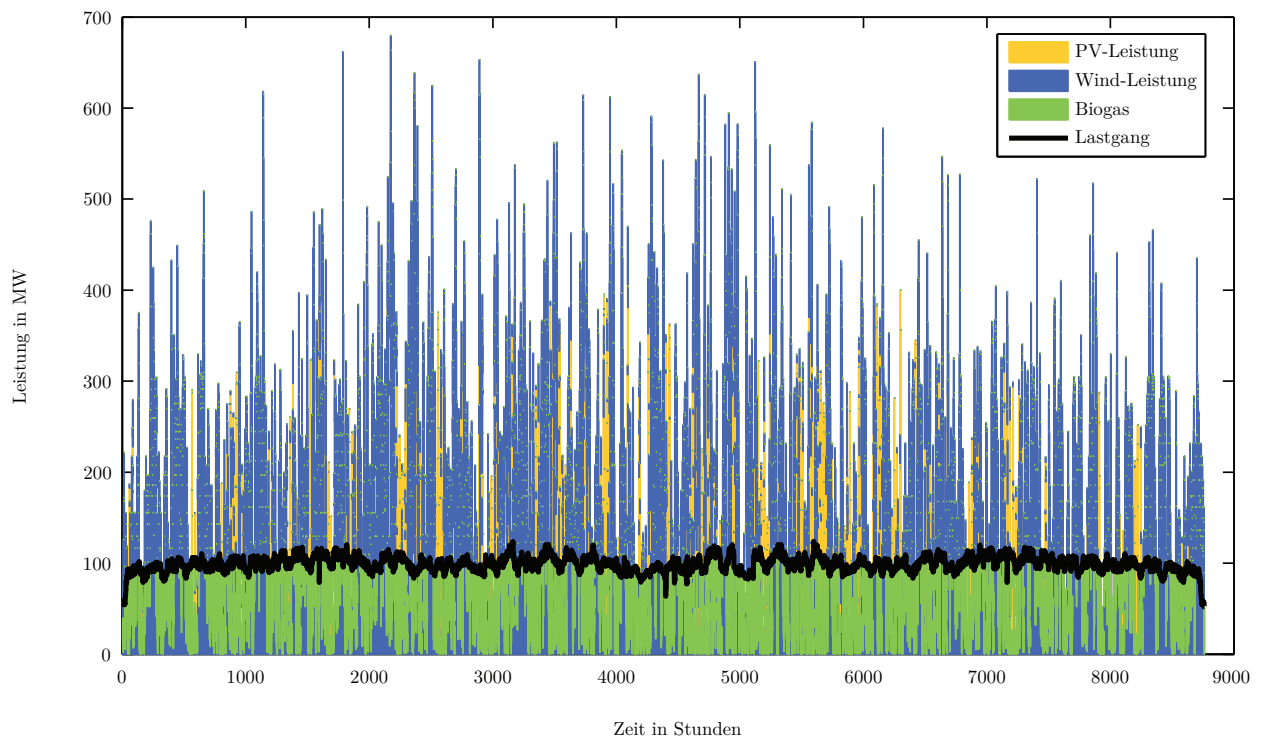


Abb. B.19.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 866 GWh und einer Erzeugerleistung von 472 MW_p Photovoltaik, 429 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 124 MW_{el}).

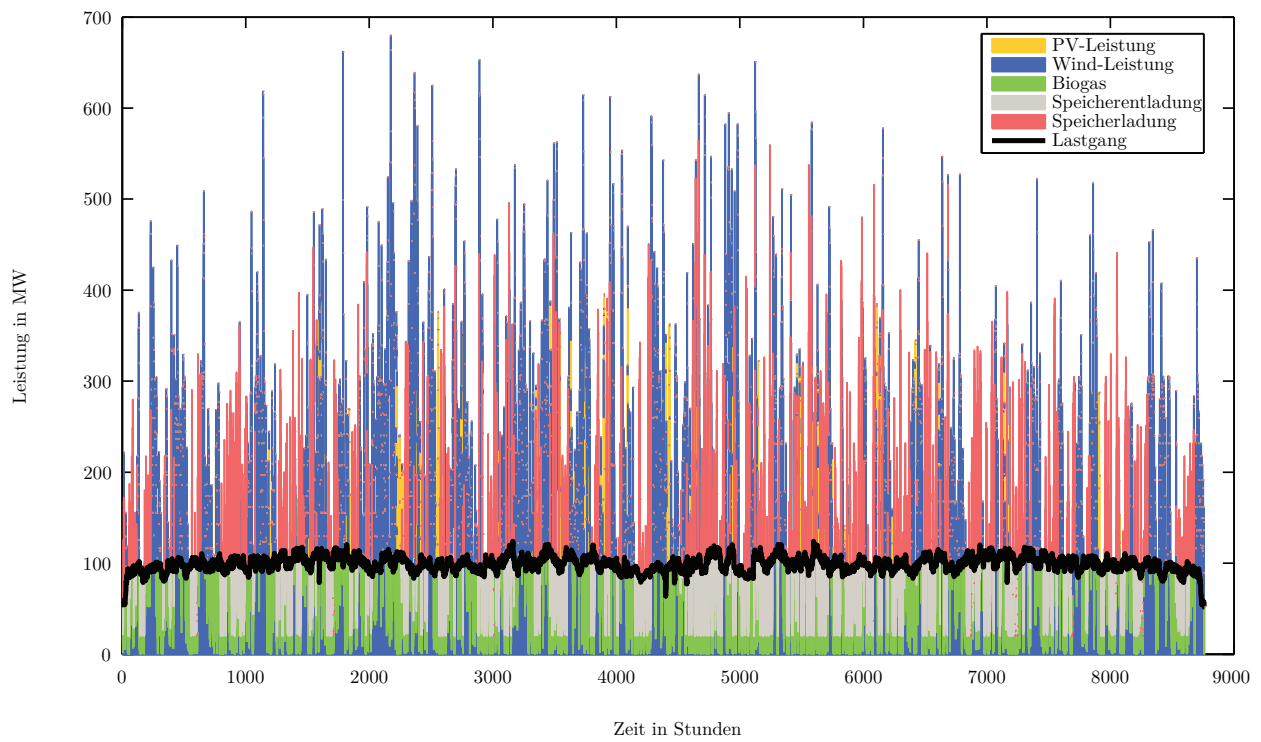


Abb. B.20.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 866 GWh und einer Erzeugerleistung von 472 MW_p Photovoltaik, 429 MW Windkraft und 20 MW_{et} Biomasse (BHKW-Leistung: 124 MW_{et}). Speicherkapazität=2.495 MWh

B.3.3. Variante hoher Windanteil

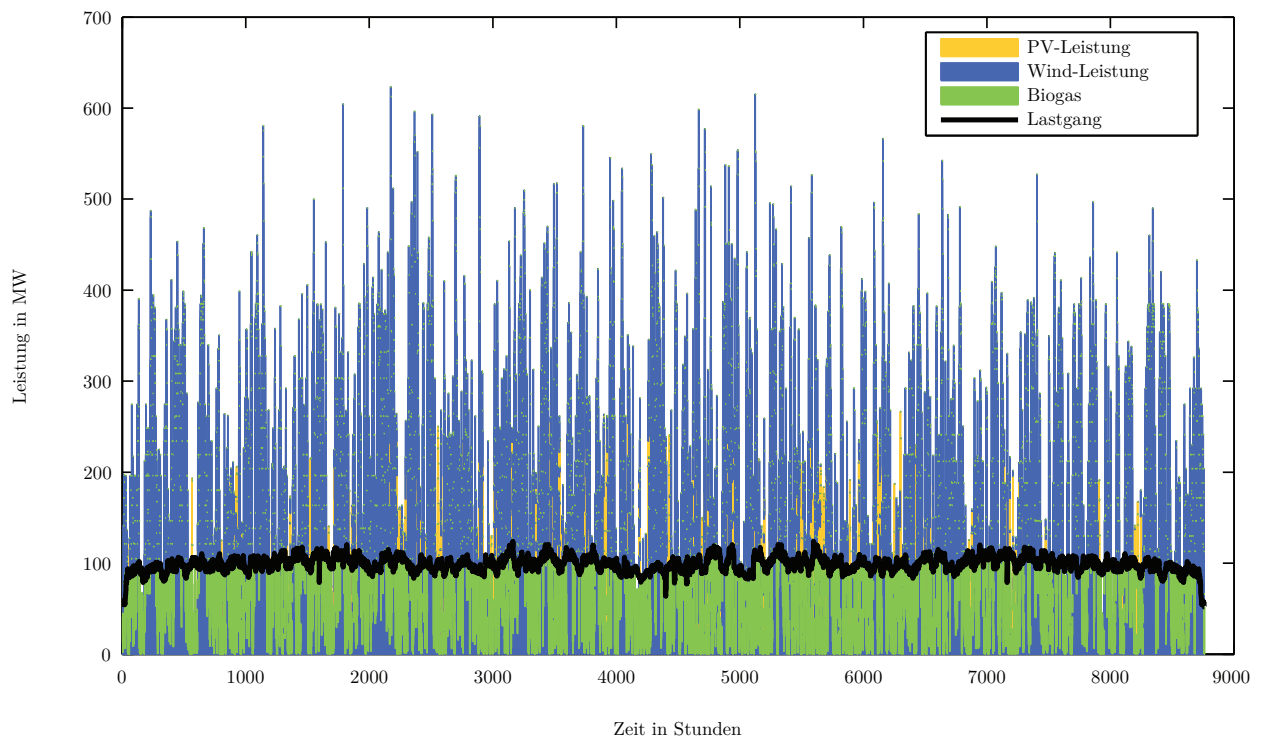


Abb. B.21.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 866 GWh und einer Erzeugerleistung von 314 MW_p Photovoltaik, 541 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 124 MW_{el}).

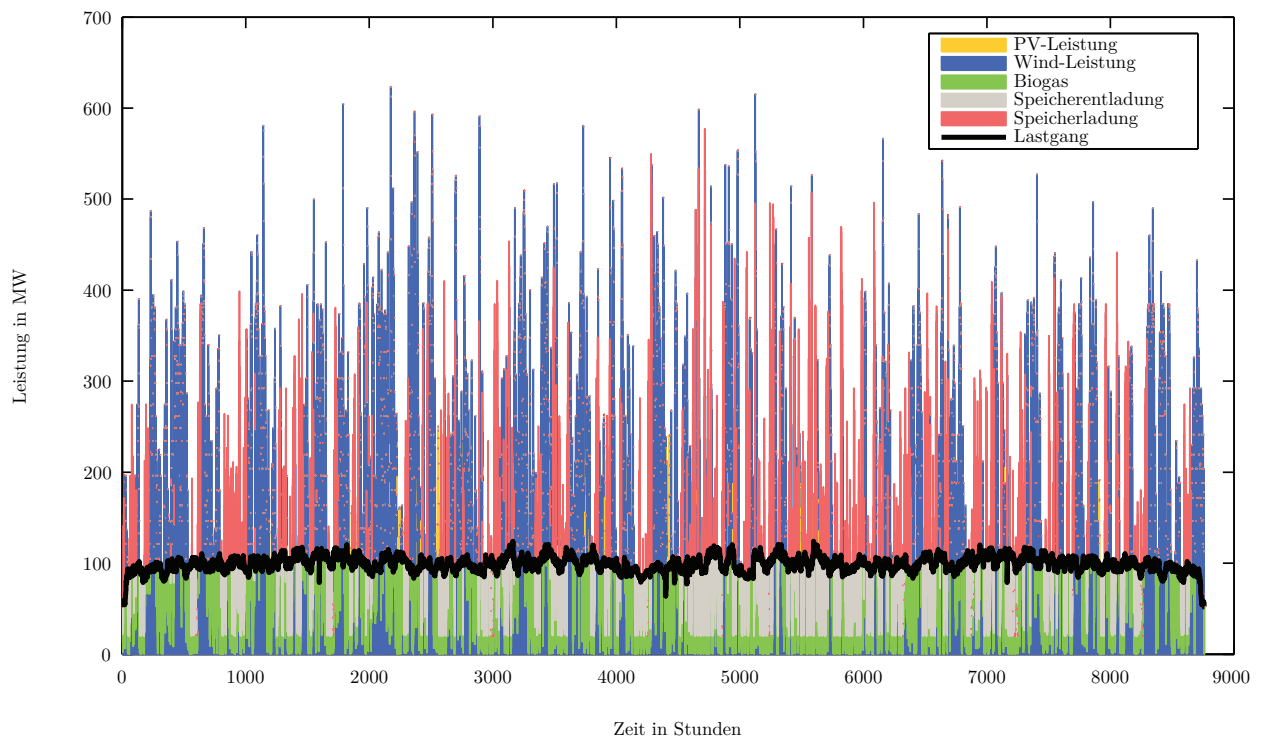


Abb. B.22.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 866 GWh und einer Erzeugerleistung von 314 MW_p Photovoltaik, 541 MW Windkraft und 20 MW_{et} Biomasse (BHKW-Leistung: 124 MW_{et}). Speicherkapazität=2.824 MWh

B.3.4. Variante Maximum

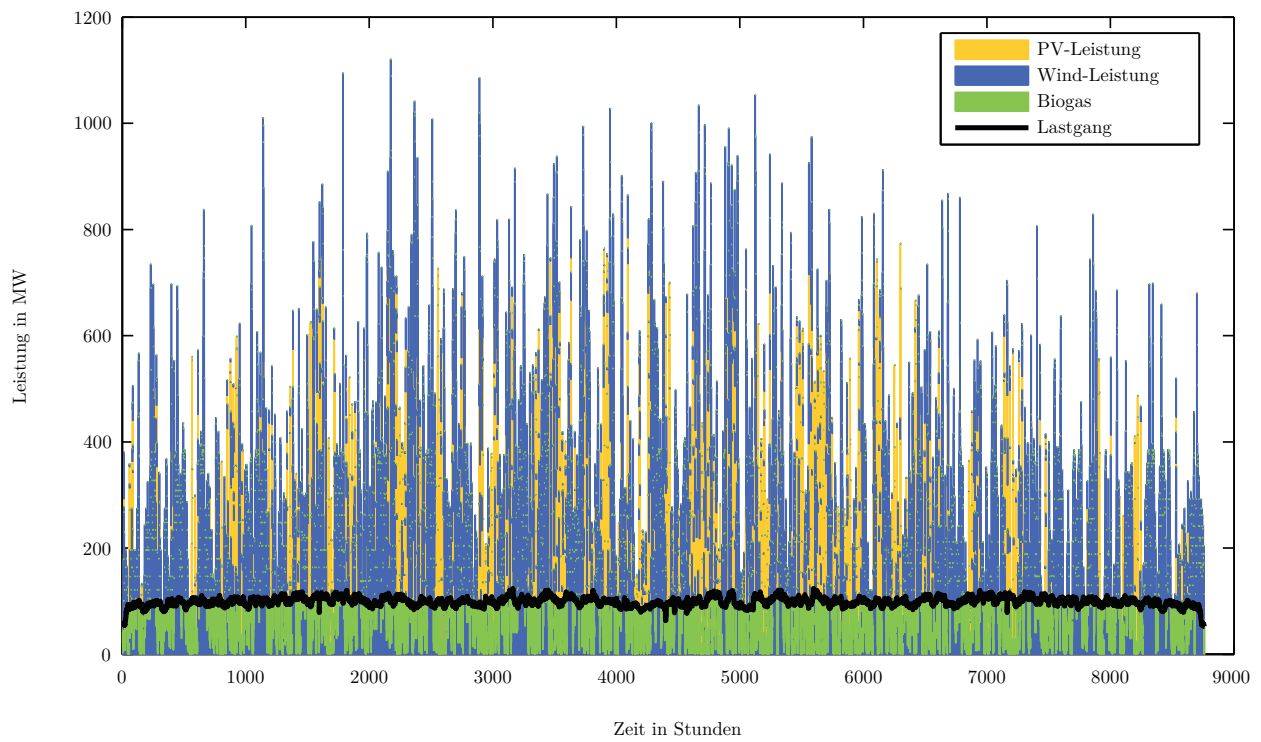


Abb. B.23.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 866 GWh und einer Erzeugerleistung von 912 MW_p Photovoltaik, 541 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 124 MW_{el}).

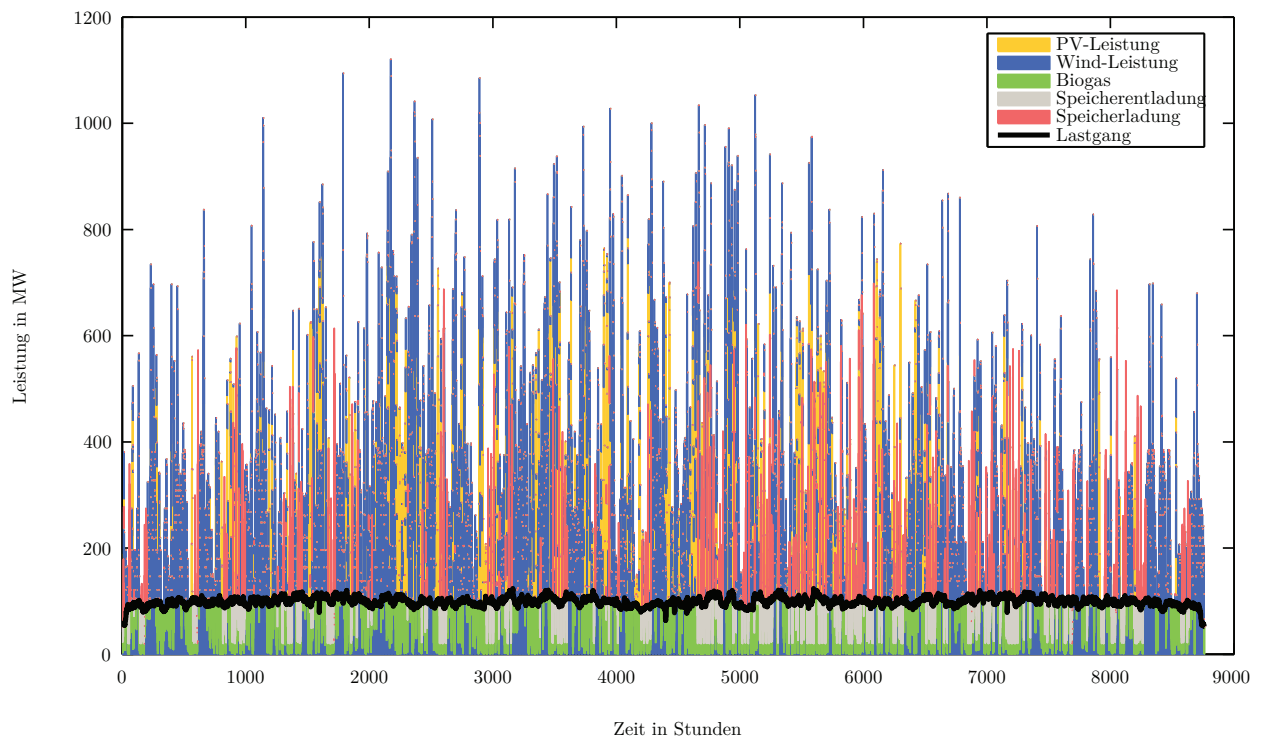


Abb. B.24.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 866 GWh und einer Erzeugerleistung von 912 MW_p Photovoltaik, 541 MW Windkraft und 20 MW_{et} Biomasse (BHKW-Leistung: 124 MW_{et}). Speicherkapazität=1.770 MWh

B.4. Bedarfssteigerung 146 MW

B.4.1. Variante hoher PV Anteil

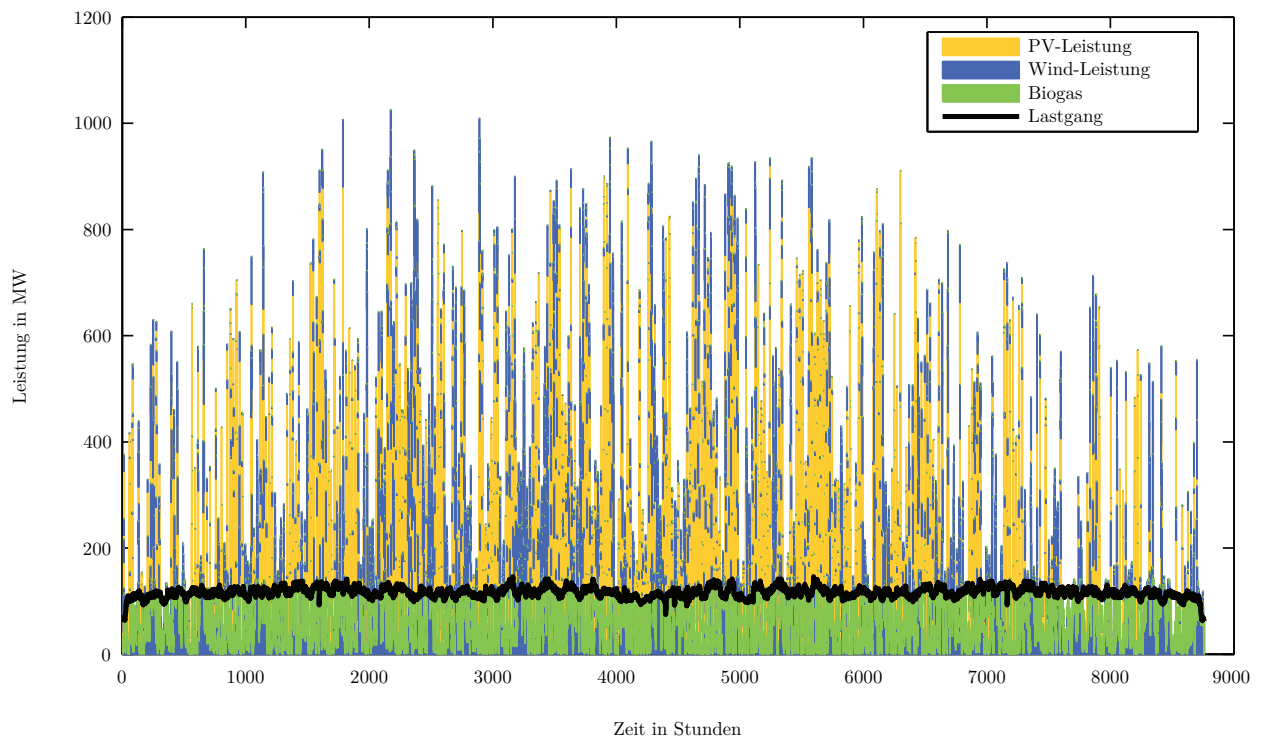


Abb. B.25.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh und einer Erzeugerleistung von 1.074 MW_p Photovoltaik, 198 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 146 MW_{el}).

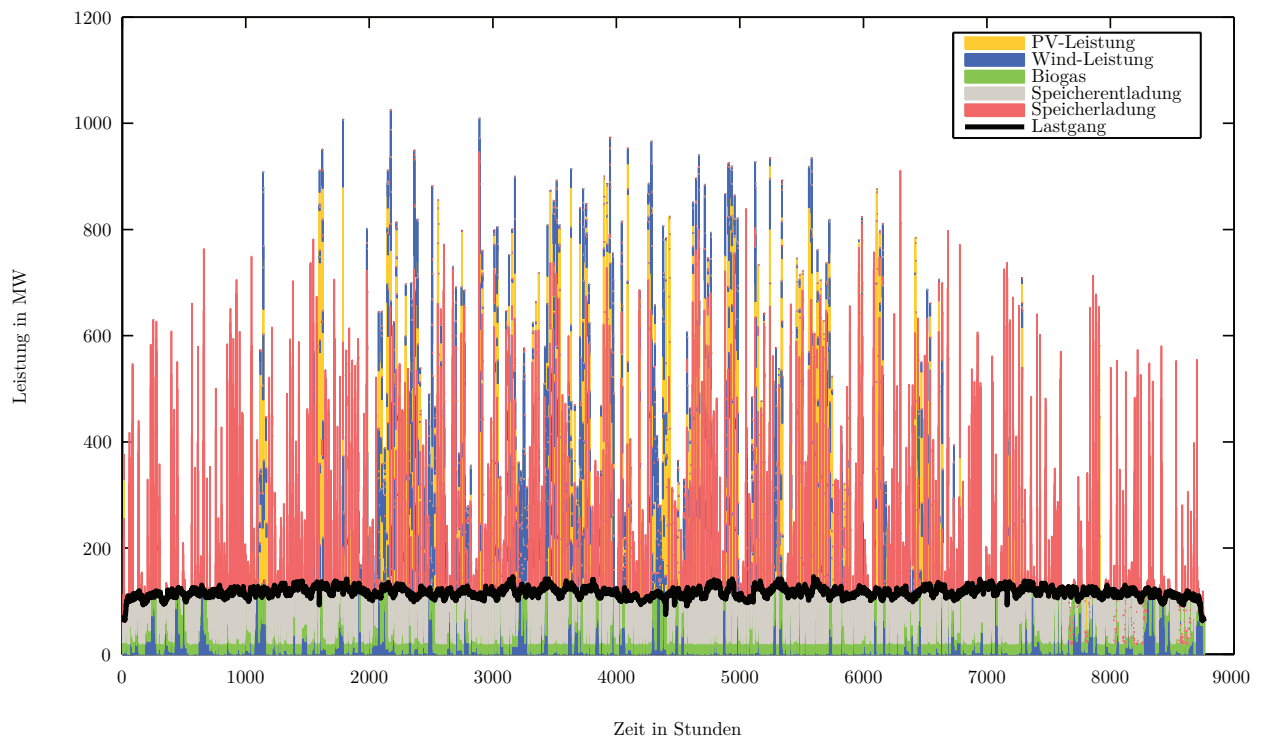


Abb. B.26.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh und einer Erzeugerleistung von 1.074 MW_p Photovoltaik, 198 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 146 MW_{el}). Speicherkapazität=7.668 MWh.

B.4.2. Variante Medium

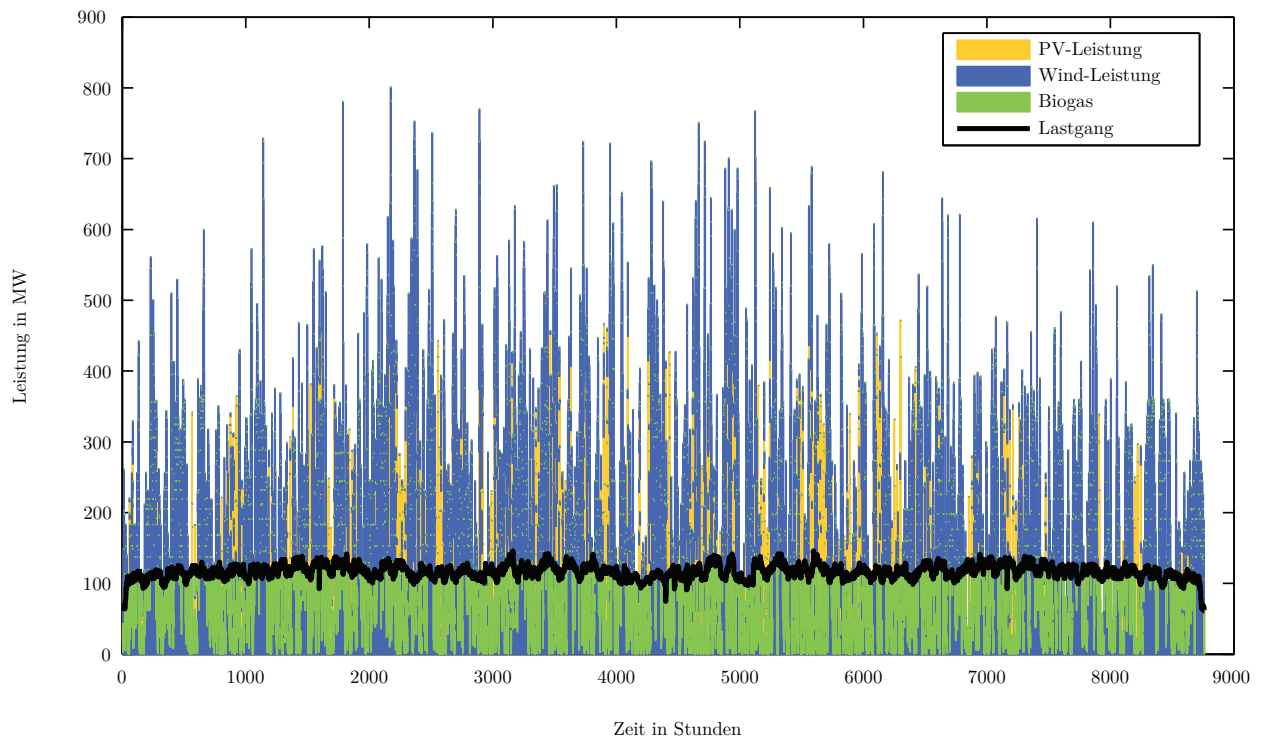


Abb. B.27.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh und einer Erzeugerleistung von 556 MW_p Photovoltaik, 506 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 146 MW_{el}).

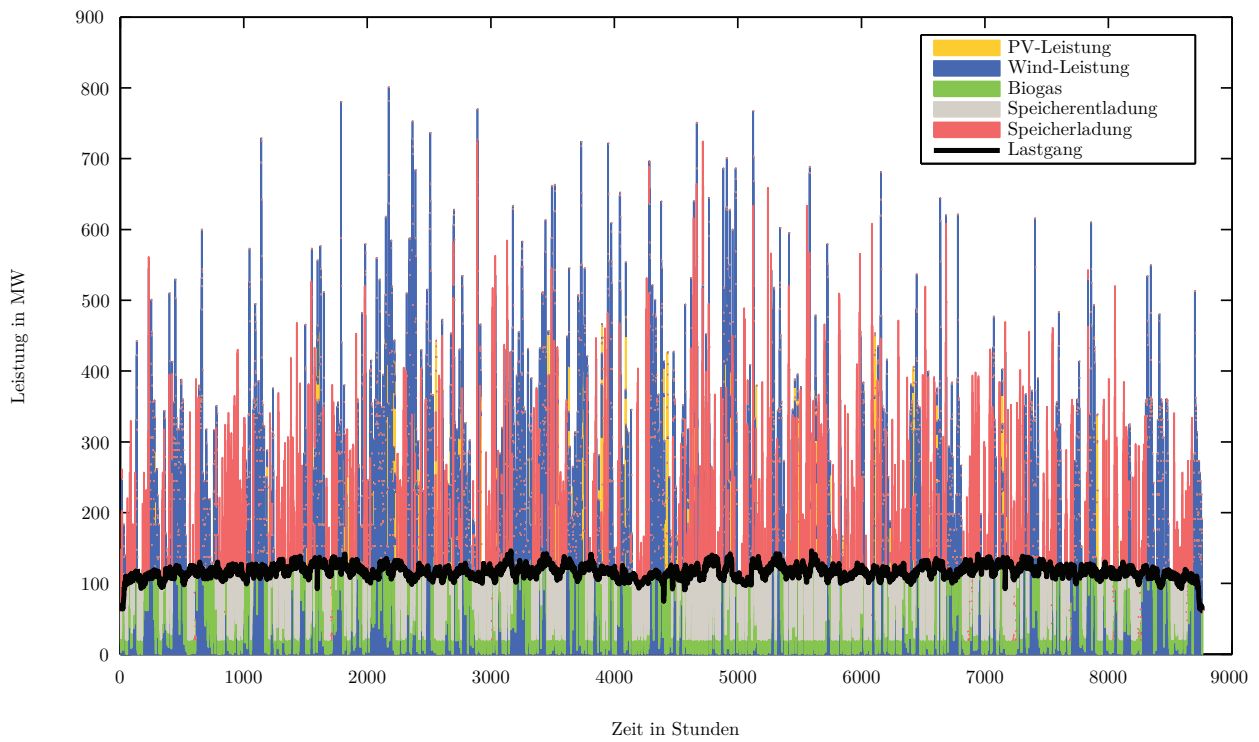


Abb. B.28.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicharentladezyklen bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh und einer Erzeugerleistung von 556 MW_p Photovoltaik, 506 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 146 MW_{el}). Speicherkapazität=3.287 MWh

B.4.3. Variante hoher Windanteil

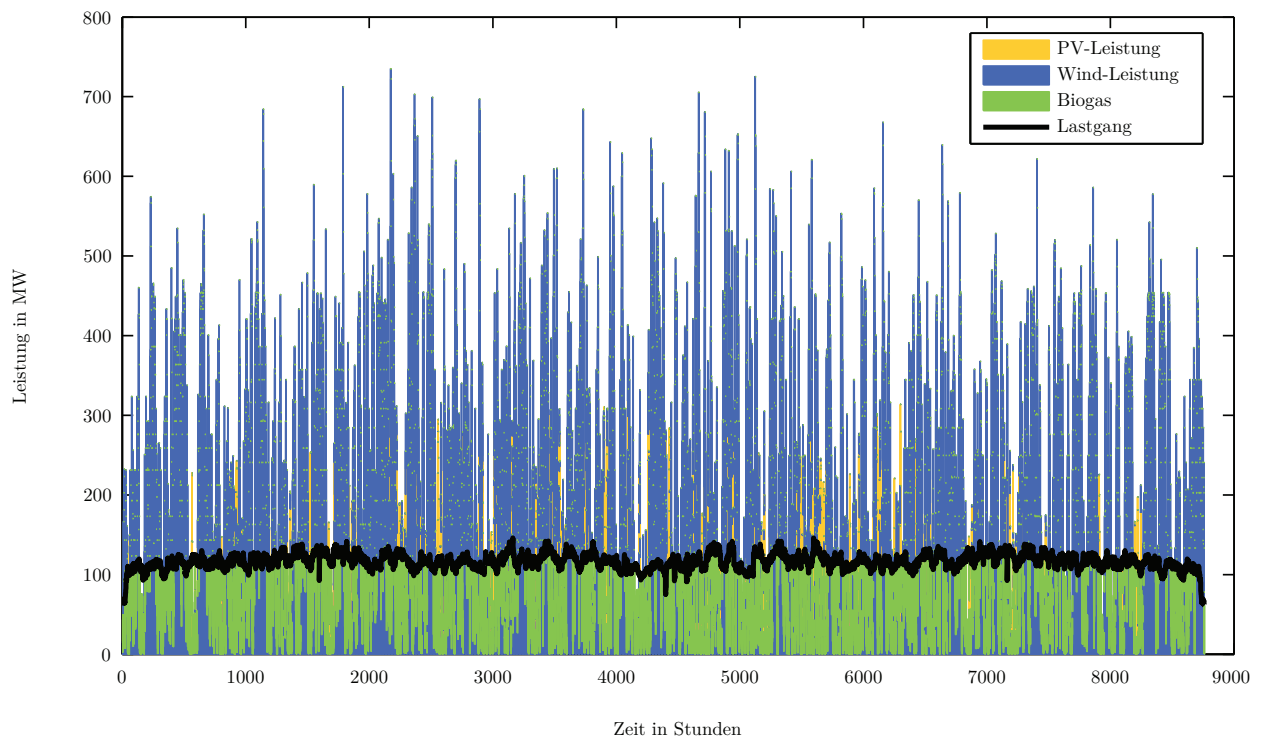


Abb. B.29.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh und einer Erzeugerleistung von 370 MW_p Photovoltaik, 638 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 146 MW_{el}).

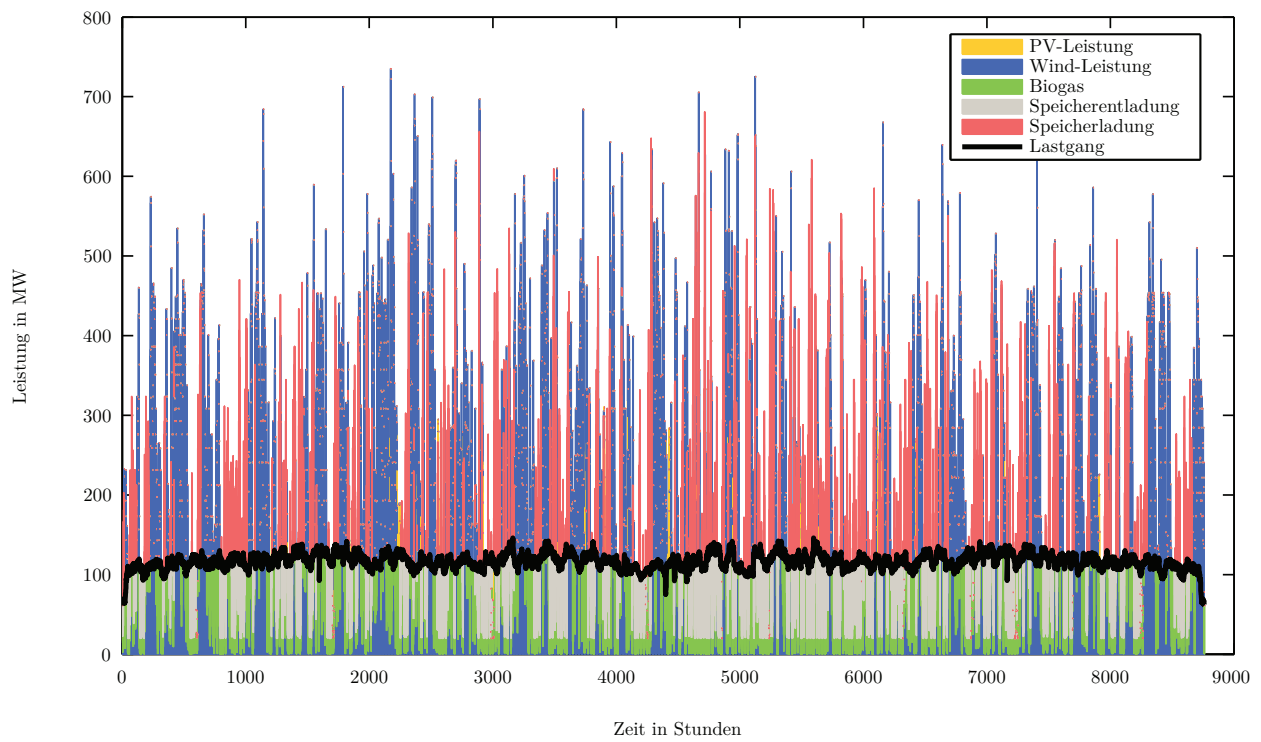


Abb. B.30.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicherentladezyklen bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh und einer Erzeugerleistung von 370 MW_p Photovoltaik, 638 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 146 MW_{el}). Speicherkapazität=3.540 MWh

B.4.4. Variante Maximum

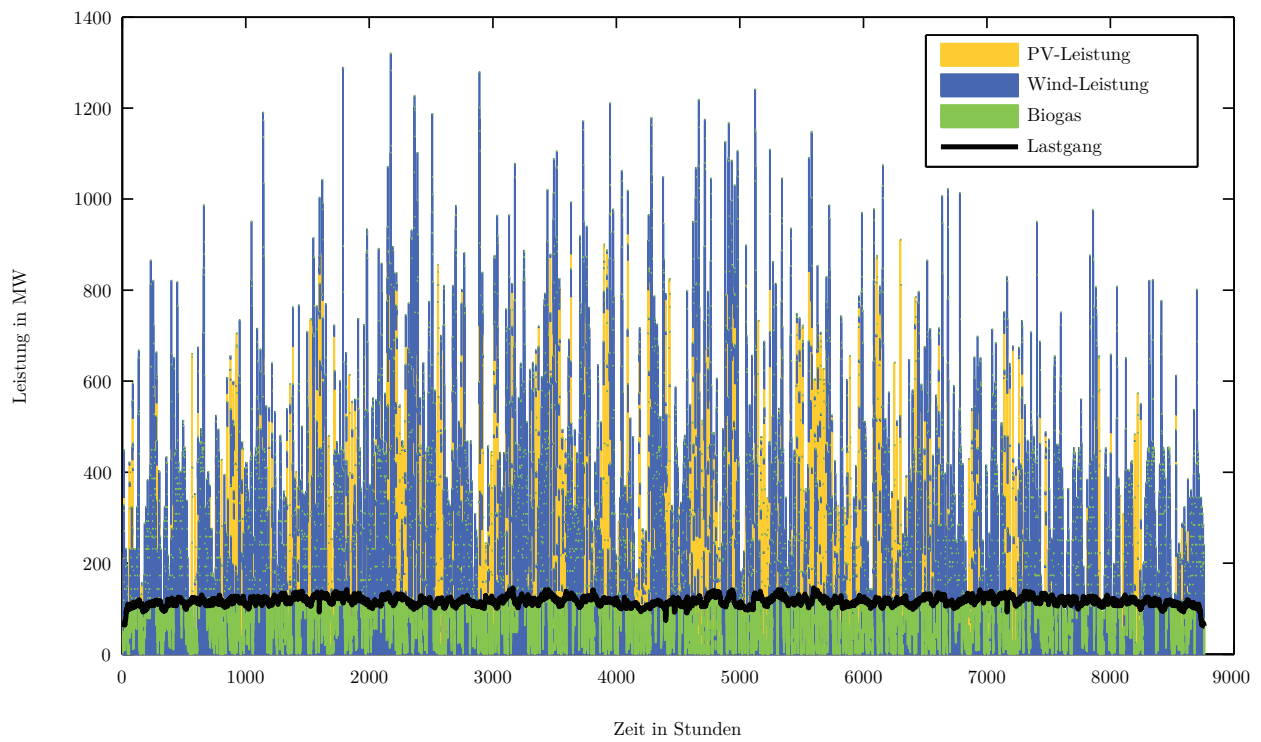


Abb. B.31.: Lastgang bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh und einer Erzeugerleistung von 1.074 MW_p Photovoltaik, 638 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 146 MW_{el}).

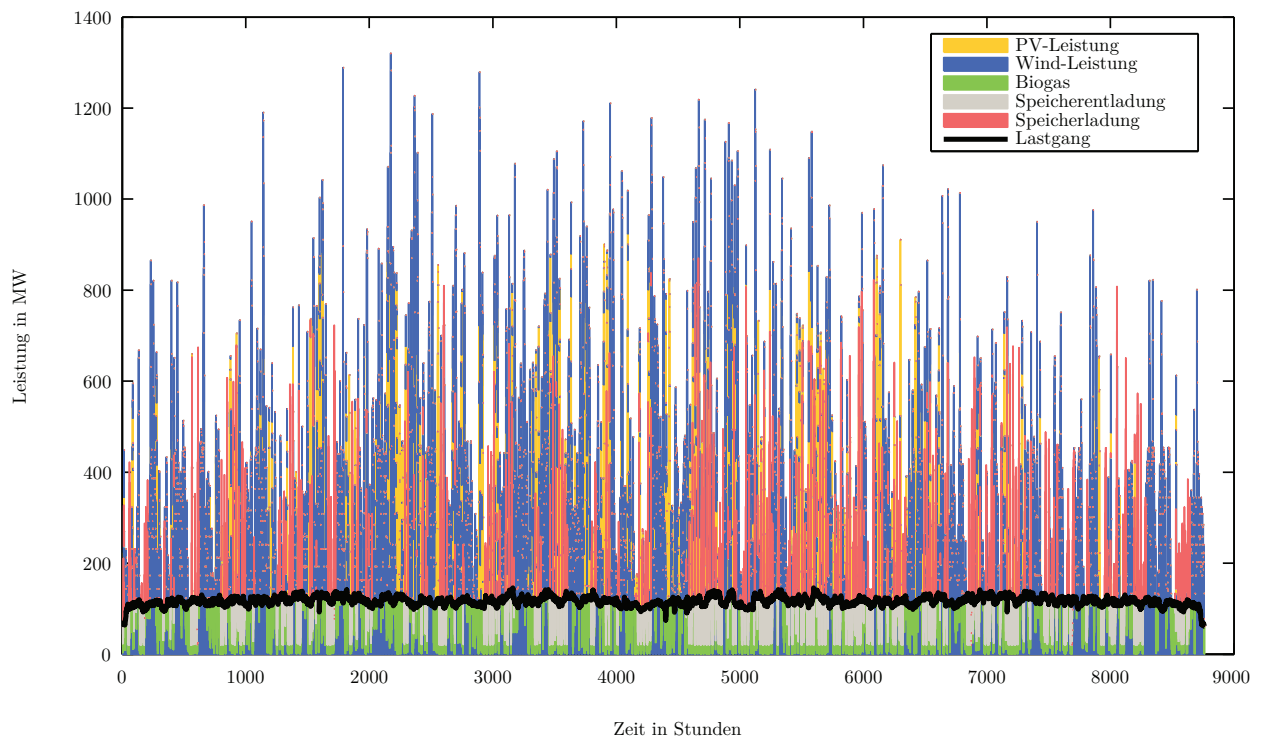


Abb. B.32.: Lastgang mit Speicherlade- und Speicharentladezyklen bei einem Energiebedarf von 1.020 GWh und einer Erzeugerleistung von 1.074 MW_p Photovoltaik, 638 MW Windkraft und 20 MW_{el} Biomasse (BHKW-Leistung: 146 MW_{el}). Speicherkapazität=2.622 MWh

Literaturverzeichnis

- [1] TMWAT (Hrsg.): *Neue Energie für Thüringen*. Erfurt, 2011
- [2] ILM-KREIS, Landratsamt (Hrsg.): *Standortblatt Industriegroßfläche Erfurter Kreuz*. 25.07.2012
- [3] BMU (Hrsg.): *Erneuerbare Energien Gesetz*
- [4] BMU (Hrsg.): *Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global*. Berlin, 2010
- [5] BURGER, B.: *Stromerzeugung aus Solar- und Windenergie im Jahr 2012*. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, 26.11.2012. – Forschungsbericht
- [6] FNR (Hrsg.): *Leitfaden Biogas - Von der Gewinnung zur Nutzung*. 5., vollständig überarbeitete Auflage. Gülzow, 2010
- [7] KALTSCHMITT, M. (Hrsg.) ; STREICHER, W. (Hrsg.) ; WIESE, A. (Hrsg.): *Erneuerbare Energien - Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 4. Auflage. Springer, 2006
- [8] KLEIMAIER, M.: *Energiespeicherung (Ergebnisse einr VDE Studie)*. Leipzig : Expertentreffen Energiemetropole Leipzig, 07.12.2009
- [9] LORENZ, E.: *Solarstrahlungsdaten*. Bad Staffelstein, 28. Februar 2011 (OTTI-Fachforum Ertragsgutachten für Photovoltaikanlagen)
- [10] SCHABBACH, T. ; WESSELAK, V.: *Energie - Die Zukunft wird erneuerbar*. Springer, 2012 (Technik im Fokus)
- [11] WESSELAK, V. ; SCHABBACH, T.: *Regenerative Energietechnik*. Springer, 2009

WEITERFÜHRENDE INFORMATIONEN



Dirk Adams

*Sprecher für Energie, Innenpolitik, Tourismus
und Technologie*

Telefon: 0361/3772673

E-Mail: dirk.adams@gruene-fraktion.thueringen.de



Norbert Sonderrmann

Referent für Energie und Klima

Telefon: 0361/3772692

E-Mail: norbert.sonderrmann@gruene-fraktion.thueringen.de

IMPRESSUM

Eine Publikation von
BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN
Landtagsfraktion Thüringen
Jürgen-Fuchs-Straße 1, 99096 Erfurt

Telefon 0361/3772670
E-Mail info@gruene-fraktion.thueringen.de
Internet www.gruene-fraktion.thueringen.de

Stand: April 2013. Dieses Material darf nicht zu Wahlkampfzwecken verwendet werden.
Wir nutzen Ihre gespeicherten Kontaktdaten ausschließlich für die Zusendung
von Informationen über unsere parlamentarische Arbeit. Nachfragen oder Widersprüche an datenschutz@gruene-fraktion.thueringen.de
Fotos: BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN Landtagsfraktion Thüringen, © LEG Thüringen, 1-SE-16653@Bosch Solar Energy AG, © Jörg Rammer - Fotolia.com, © Peter Heilmann@flickr, © MiGowa@flickr, © Jürgen Fälchle - Fotolia.com